

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH ZDROJE 1000A AC PRO KALIBRACI SENZORŮ PROUDU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

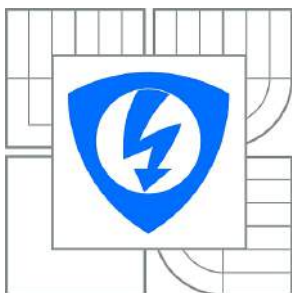
JAN KLIMEŠ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## NÁVRH ZDROJE 1000A AC PRO KALIBRACI SENZORŮ PROUDU

DRAFT SOURCES 1000A AC CURRENT SENSORS FOR CALIBRATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN KLIMEŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR DOHNAL, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

**Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

**Student:** Jan Klimeš

**ID:** 155174

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh zdroje 1000A AC pro kalibraci senzorů proudu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se s návrhem a funkcí transformátorů na velké proudy a jejich přesným měřením při vysoké přesnosti
- 2) Navrhněte a ve spolupráci s vedoucím práce sestrojte funkční vzor demonstrátoru pro přesné měření střídavého proudu 1000A
- 3) Vypočítejte přesnost demonstrátoru
- 4) Proveďte kalibraci demonstrátoru

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, Otto a kol. : Elektrické přístroje učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických, SNTL 1985
- [2] Mišáček J., Zoubek Z. : Elektrické stroje, skriptum ĚVUT 1990
- [3] Patočka, Miroslav: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice, VUTUM 2011

**Termín zadání:** 22.9.2014

**Termín odevzdání:** 2.6.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Dohnal, Ph.D.

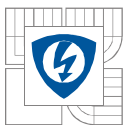
**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

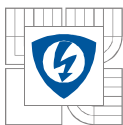


## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá konstrukcí, soustavou stávajícího zdroje 1000 A a zařízení, pro přesnou měření, velkých proudů. Jsou zde teoreticky rozbrány možnosti, klasických řešení, jako jsou proudové transformátory i modernější, metody podobné proudovým senzorům. Je zde řešena problematika přesnosti a možnosti zpřesnění jak snížit systematickou chybu. Do hloubky je zde rozebrána stavba proudového transformátoru, zpracování, analogového signálu na digitální, a následně frekvencí zpracování získaného signálu. Zkonstruované zařízení je následně otestováno na svoji finální přesnost.

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with design and construction of device for precise measurement of 1000 A alternate current. This thesis theoretically discusses the possibilities of conventional solutions, such as current transformers, as well as modern methods in the form of current sensors. The output of this thesis is a solution of problems with accuracy and discussion of other possible ways to reduce systematic error. The thesis discusses structure of the current transformer, the digitalizing of the signal and its usage as an input for engineering units. The device is then tested for final accuracy.

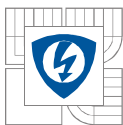


## KLÍČOVÁ SLOVA

Měření, proud, třída přesnosti, proudový transformátor, proudový zdroj, kalibrace, arduino, mikrokontroler...

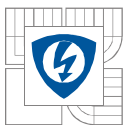
## KEYWORDS

Current measurement, accuracy class, instrument current transformer, current source, calibration, arduino, microcontroller



## BIBLIOGRAFICKÉ CITACE

KLIMEŠ, J. Návrh zdroje 1000A AC pro kalibraci senzorů proudu. Brno: Vysoké učení, technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Čestav věkonov... elektrotechniky a elektroniky, 2015. 49 s. a 23 s. přílohy. Bakalářská práce. Vedouc., práce: Ing. Petr Dohnal Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Živý proudový zdroj 1000A pro kalibraci senzorů proudu*, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou v seznamu citovaných prací a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorské práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení, ustanovených a následujících zůstačků f. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění, pozdějších předpisů, včetně možných trestních právních důsledků vyplývajících z ustanovení, dalšími druhy, hlavy VI. dalšími trestními, zůstačků f. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

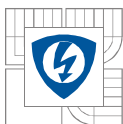
## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrálního práce Ing. Petru Dohnalovi Ph.D. za jeho čas, cenné rady a ochotu pomoci vedením, mé práci, za kterou jsem velice vděčný.

V Brně dne .....

.....

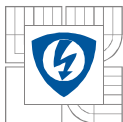
(podpis autora)



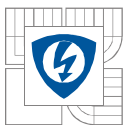
## OBSAH

<b>Seznam obr...zků</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>11</b>
<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Metody měření proudu</b>	<b>13</b>
1.1 Měření proudu pomocí magnetometru.....	13
1.2 Měření proudu pomocí Hallovy sondy.....	13
1.3 Měření proudu pomocí Rogowského cívky.....	15
1.4 Měření proudu pomocí proudového transformátoru.....	16
1.5 Vyhodnocení metod měření proudu.....	17
<b>2 Přesnost strojových transformátorů proudu</b>	<b>18</b>
2.1 Úfel a délka, přesnost strojových transformátorů proudu.....	18
2.2 Měření, c., transformátor proudu.....	18
2.3 Jistota, c., transformátor proudu.....	18
2.4 Princip a konstrukce přesnost strojových transformátorů proudu .....	19
2.5 Nejistota měření, měření, c., ch transformátorů proudu.....	19
2.6 Elektronická korekce přesnosti.....	21
2.7 Proudový transformátor se zpětnovazebnou korekcí, chyby.....	23
<b>3 Vlastnosti návrhu měření</b>	<b>24</b>
3.1 Volba proudového transformátoru.....	24
3.2 Volba zdroje.....	25
3.3 Volba bočníku.....	25
3.4 Volba RMS to DC převodníku.....	26
3.5 Volba A/D převodníku a referenčního zdroje.....	26
3.6 Volba operačního zesilovače.....	28
3.7 Volba napájecího zdroje.....	28
<b>4 Zapojení komponent</b>	<b>30</b>
4.1 Zapojení, RMS to DC převodníku.....	30
4.2 Zapojení, napájení... reference REF5020.....	31
4.3 Zapojení, A/D převodníku AD7715.....	32



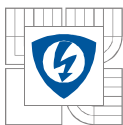


<b>5</b>	<b>Návrh a konstrukce</b>	<b>33</b>
5.1	První, varianta elektrického schématu.....	33
5.2	První, varianta - deska plošného spoje.....	34
5.3	Druhá varianta - elektrického schématu.....	34
5.4	Druhá varianta - deska plošného spoje.....	35
5.5	Návrh komunikace.....	35
5.6	Kód komunikace z mikrokontroléru.....	37
5.7	Zpracování, dat z mikrokontroléru.....	38
<b>6</b>	<b>Výpočet teoretické přesnosti/nejistoty soustavy</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>Ověření přesnosti/nejistoty soustavy</b>	<b>41</b>
7.1	Tabulky výsledků .....	41
7.2	Překlad v programu.....	43
7.3	Grafické zobrazení, naměřených výsledků.....	44
7.4	Adjustace v programu proudu demonstrátorem.....	44
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>46</b>
	<b>Použitá literatura</b>	<b>47</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>49</b>
	<b>Seznam součástí</b>	<b>50</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>51</b>



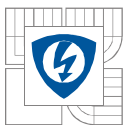
## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Princip Hallovy sondy (převzato z [3]).....	14
Obrázek 2: Kompenzovaná Hallova sonda od firmy LEM (převzato z [15]).....	15
Obrázek 3: Rogowského cívka z modelov... řady A100 od firmy ChauvArnoux (převzato ze zdroje [12]) .....	16
Obrázek 4: Schéma měřícího transformátoru (převzato z [2]).....	19
Obrázek 5: Náhradní schéma transformátoru zobrazující magnetizační proud (převzato z [16])	20
Obrázek 6: Magnetizační charakteristiky pro feromagnetické materiály a pro vzduch.....	20
Obrázek 7: Zřetězení budícího proudu (magnetického toku) na plošném napětí, (překresleno z [8]) .....	21
Obrázek 8: Proudový transformátor s elektronickou korekcí přesnosti (převzato z [5]).....	22
Obrázek 9: Schéma PTP se zpětnovazební kompenzací.....	23
Obrázek 10: Schéma zapojení transformátoru spolu s metodou zesílení, napětíového signálu	24
Obrázek 11: Schéma zpracování, analogového signálu digitálně.....	24
Obrázek 12: Schéma uzemnění, odporu.....	26
Obrázek 13: Napájení, měřící, soustavy.....	29
Obrázek 14: Zapojení, RMS to DC převodníku (převzato z [14]).....	30
Obrázek 15: Graf pro určení velikosti kondenzátoru $C_v$ na základě frekvence a plošné chyby (převzato z [14]).....	31
Obrázek 16: Zapojení, napětíové reference REF5020 (převzato z [15].).....	31
Obrázek 17: Zapojení, analog-digitální převodníku AD7715 (převzato z [17].).....	32
Obrázek 18: Návrh desky plošného spoje pro variantu bez operačního zesilovače.....	34
Obrázek 19: Návrh desky plošného spoje pro variantu operačního zesilovače.....	35
Obrázek 20: Ukázka komunikace AD převodníku AD7715 (převzato z [17].).....	36



## SEZNAM TABULEK

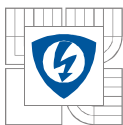
Tabulka 1: Porovnání, metod měření, proudu.....	17
Tabulka 2: Rozpis součástí a jejich napájení.....	28
Tabulka 3: Tabulka přesnosti, dle, jejich prvků.....	40
Tabulka 4: Legenda naměřených a vypočtených hodnot.....	41
Tabulka 5: Konstanty pro výpočet .....	41
Tabulka 6: Naměřen... a vypočten... hodnoty.....	42
Tabulka 7: Naměřen... a vypočten... hodnoty.2.....	43
Tabulka 8: Tabulka měřících, a, strojů.....	44



## ÚVOD

Tato práce se zabývá přesným měřením velkých proudů a u klasických metodami jako je proudový transformátor proudu, tak i modernějšími metodami jako je Hallova sonda, Rogowskiho cívka, či kompenzovaný proudový transformátor. Tyto proudové stroje jsou energetice velmi drahé, představují technickoekonomické optimum, protože není potřeba stavět drahé měřící proudové stroje velkých výkonů. Naopak je možné ve velkém vyrábět proudové stroje normalizované. Následně je pak možné vysoké proudové a napávací hladiny snížit na tyto normalizované hodnoty. Díky tyto proudové stroje zajišťují galvanické oddělení, obvod měřených a měřících, frekvenci, nejen měřících proudových stroje, ale také jejich obsluhu.

Konkrétně, cílem této práce je sestavit soustavu standardního proudového zdroje 1000 A a měřícího proudového pravku a následně ověřením přesnosti dané soustavy. Tato soustava pak může sloužit pro laboratorní, v úce elektrických proudových strojů či jako záložní, pro kalibraci proudových transformátorů a senzorů.



# 1 METODY MĚŘENÍ PROUDU

Jelikož hlavním cílem této práce je navrhnout, zejména, měřící... by bylo schopno měřit... proudy s velkou citlivostí, bylo určeno malé množství dostupných metod.

## 1.1 Měření proudu pomocí magnetometru

Tato metoda vychází z faktu, že proud vytváří magnetické pole, jak je popsáno pomocí Ampérova zákona pro stacionární magnetické pole

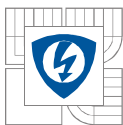
$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I_{\text{celk}} \quad (1.1)$$

kde  $\vec{B}$  je vektor magnetické indukce,  $\mu_0$  je permeabilita vakua a  $I_{\text{celk}}$  reprezentuje celkový proud procházející uzavřenou plochou. Měření proudu bylo možné pomocí magnetometru, ten se dnes používá v mobilních telefonech pro funkci kompasu. Bylo zvažováno použití, konkrétně, senzoru HMC5883L od firmy Honeywell s již integrovanými dvaceti bitovým A/D převodníkem, díky kterému je možné po napojení na I2C bus (například na vývojovou desku Arduino) poměrně snadno zjistit hodnotu magnetické indukce, kterou by bylo možné pomocí empirické stupnice určit hodnotu proudu procházející vodičem. Tato metoda však naráží na mnohá problémová místa, jako je především rozsah, kterým je možné měřit magnetické pole, je jeho rozsah 8 Gauss do + 8 Gauss, což by pro naše účely nestačilo. Bylo by stejně nutné použít snímač, jako transformátor nebo umístění senzoru do velké vzdálenosti, což není praktické ani přesné. Dále zde je problém s citlivostí magnetického pole, tyto senzory jsou obecně schopny pracovat s frekvencí 0,1 Hz, což je pro sinusové 50 Hz hrubě nedostatečné.

[1]

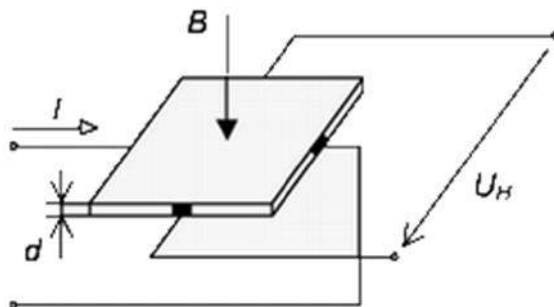
## 1.2 Měření proudu pomocí Hallovy sondy

Hallova sonda využívá takzvaný Lenzův jev, který způsobuje pohyb elektrického náboje v magnetickém poli, jak je znázorněno na Obrázku 1. Pokud vnější magnetické pole působí kolmo na destičku, tak je protékající proud vychylován na jednu stranu destičky což způsobí, jinými slovy, hustoty na obou koncích Hallovy sondy. Jinými slovy hustoty způsobí rozdíl potenciálů a tím se objeví takzvané Hallovo napětí, mezi oběma konci destičky a to podle Obr. 1



$$U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d} \quad (1.2)$$

kde  $U_H$  reprezentuje Hallovo napětí,  $R_H$  je Hallova konstanta s jednotkou  $m^3 \cdot A^{-1} \cdot s^{-1}$ ,  $I$  je proud protékající,  $d$  je tloušťka,  $B$  je magnetická indukce kolmá na směr proudu  $I$  jako tloušťka destičky



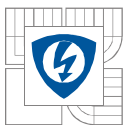
Obrázek 1: Princip Hallovy sondy (převzato [3])

Tato metoda je problematická z hlediska velikosti zesíleného signálu a jeho linearity. Jelikož je Hallovo napětí velmi malé (obvykle se jedná o jednotky mV) měřené bývá měřeno, zatímco, které se na vstupu signálu ze sondy superponuje, což se dále z frekvence kompenzovat zkroucením vodičů. Přesnost dosavadních přemyslových měření, se pohybuje okolo 0,4% kdy tato hodnota je konkrétně pro 195-3566-ND od firmy Digi-Key.

[5][9]

Avšak pomocí Hallovy sondy lze měřit i velmi přesně takzvanou kompenzační metodou, která je blíže popsána v kapitole 2.7, kde je magnetizační proud kompenzován pomocí zpětnovazebního zapojení, čímž se velmi zvyšuje přesnost. Konkrétně 0,054% pro přístroj IT 1000-S/SP1 ULTRASTAB od firmy LEM, který je zobrazen na Obrázek 2: Kompenzovaná Hallova sonda od firmy LEM (převzato z [15]) Tato měření, bylo pro nás velmi vhodné, avšak tato varianta je finančně velmi náročná.

[10]



Obrázek 2: Kompenzovaná Hallova sonda od firmy LEM (převzato z [15])

### 1.3 Měření proudu pomocí Rogowského cívky

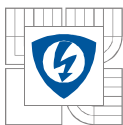
Rogowská cívka pracuje na podobném principu, jako transformátor bez feromagnetického obvodu, kde primární, vinutí, je pracovní, magnetický, a sekundární, vinutí, je samotná Rogowská cívka, která je zapojena napřímo, tudíž, neprotéká proudem. I když to není, na se na první pohled nemusí, protože liší od magnetického transformátoru proudu, tak zřejmě, vzhledem je právě v absenci magnetického obvodu, díky čemuž, nemá dynamické vlastnosti a nepřesnost, kterou způsobuje magnetizace, proud

Další, výhodou Rogowské cívky je, že její, vstup poskytuje přímo, hodnotu napětí, po integraci reprezentuje aktuální, časový průběh primárního proudu. I když se Rogowská cívka, jako ideální, možnost tak je zároveň, člena nepřesnost, způsobenou integrací, vstupního, napětí, cívky a tudíž, nevyhovuje zadanému požadavku na přesnost. Typická přesnost se může pohybovat na hranici  $-1\%$ , kdy tato hodnota konkrétně platí, pro Rogowskou cívku z modelové řady A100 od firmy Chauvin-Arnoux (převzato z [6]) Vizualizace Rogowské cívky z modelové řady A100 je na obrázku 3: Rogowské cívky z modelové řady A100 od firmy Chauvin-Arnoux (převzato ze zdroje [2])

[4] [5]







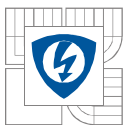
## 1.5 Vyhodnocení metod měření proudu

V rámci finálního, měřicího, metody byly založeny porovnávací tabulky: Tabulka 1: Porovnání metod měření proudu.

Tabulka 1: Porovnání metod měření proudu

Typ měření	Rozsah pr. měřícího ešení	Přesnost pr. měřícího ešení	Cena př. měřícího ešení pro 1000A	Výsledek
<b>Magnetometr</b>	0-1000AAC (nen., přím. měření)	někdy, nevyhovující, (>10%)	někdy (cca 100 CZK)	neuspokojivě
<b>Halova sonda</b>	0-1000AAC	někdy, nevyhovující, (1-5%)	někdy (cca 100ky CZK)	neuspokojivě
<b>Kompenzovaná Halova sonda (typ)</b>	0-1000A Vyhovující,	vůbec (0,005%)	vysoká (cca 30.000 CZK)	Dobře
<b>Rogovského cívka</b>	0-2000A Vyhovující,	dobře (0,5%)	dobře (cca 5000CZK)	Dobře
<b>PTP</b>	0-6000A Vyhovující,	vůbec 0,1%	velmi dobře cca 4000CZK	velmi dobře

Z tabulky Tabulka 1: Porovnání metod měření proudu vyplývá, že nejlepší metodou je kompenzovaná Halova sonda viz. Kapitola 1.2 avšak takováto zařízení velmi drahá a jedná se o technologicky náročné měření, proto dále jsme se rozhodli nadále vztahovat porovnání metod měření proudu... transformátory.



## 2 PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU

V následujícím textu budou představeny principy a význam přístrojových transformátorů proudu.

### 2.1 Účel a dělení přístrojových transformátorů proudu

Přístrojové transformátory využíváme především k měření, nebo k ochraně, od nich jsou také odvozeny základní kategorie zaprv... měřící transformátory proudu a zadruhé... jističe, transformátory proudu. V rámci naplnění, toto práce je podstatnější, měřící, transformátor proudu, takže mu bude věnováno více prostoru.

[2]

### 2.2 Měřící transformátor proudu

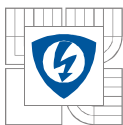
Slouží, k zvěšení, rozsahu měřící, přístrojů. Jelikož by bylo obtížné... a neekonomické... vyrábět ampérmetr použitelný např. pro proudy... soustav, kde se proudy mohou pohybovat až do tisíce, ampér, nabízejí se možnost využití transformátoru a dostat tak hodnoty v řádu jednotek ampér, které jsou měřitelné i běžně dostupnými přístroji.

[2]

### 2.3 Jistič transformátor proudu

Jističe, transformátory slouží, pro napájení, ochranu vedení. U těchto transformátorů jde také o to převést vysoké proudové hladiny na nižší, ale jsou zde na rozdíl od měřících, transformátorů větší rychlost proudění a zároveň na přesnost při poruchových stavech, jako jsou zkrat a nadproudy.

[2]

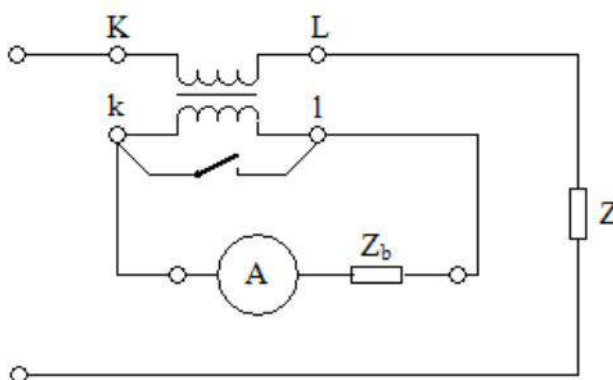


## 2.4 Princip a konstrukce proudových transformátorů

Obecný princip transformátorů vychází z Faradayovy zákona elektromagnetické indukce, kde magnetický tok je důsledkem proudů primárního vinutí. Tento magnetický tok následně protéká sekundárním vinutím, kde indukuje napětí, které je přímo úměrné napětí na primárním vinutí, krát poměr závitů primárního k počtu závitů sekundárního vinutí. Zato měno převodu proudů probíhá poměrně opačným směrem.

Na schématu n., viz Obr. 4e vidíte, že měno, proudový transformátor je tvořen primárním vinutím, které má většinou buď jeden závit, ten je seriálně zapojen do měnoho obvodu, dále je zde sekundární vinutí, které početem závitů odpovídá převodu, respektive proudu, který chceme a dokážeme měřit. U sekundárního vinutí je třeba si všimnout velmi důležitého prvku a tou je zkratovací (přímý... propojení, svorek Žk a Žl), bez tohoto prvku nelze transformátor provozovat, protože v případě, že by se jakkoliv důvodu přehřel měno, obvod ampermetru by bylo potřeba velmi rychle servisovat, prohlédnout ampermetr odpojit a sekundární vinutí, by tedy bylo uzavřeno a mezi svorkami Žk a Žl by se indukovalo nebezpečné napětí. V případě, že je namontován zkratovací, tak se po odpojení ampermetru zkratují svorky Žk a Žl a sekundární vinutí bude zapojeno nakrátko. Dále u jen zbývá ampermetr sekundárního obvodu, který nám měno, již transformovanou hodnotu proudu.

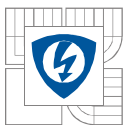
[2]



Obrázek 4: Schéma měno, proudového transformátoru (převzato z [2])

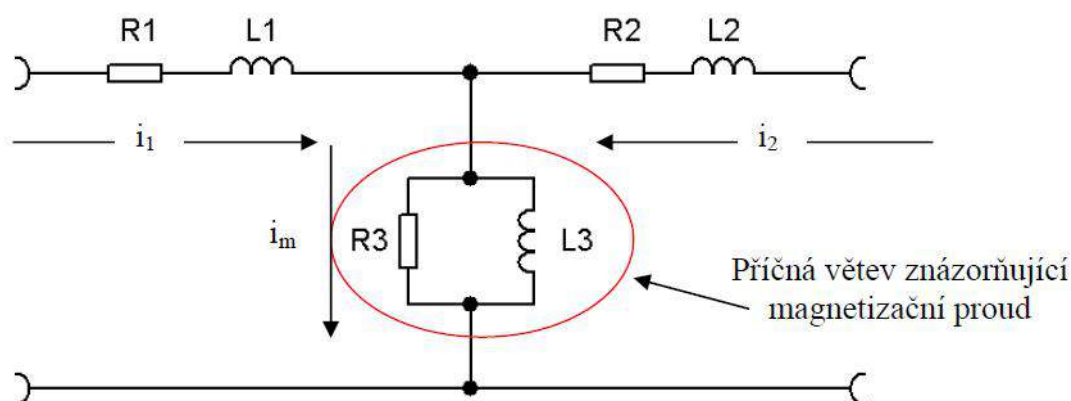
## 2.5 Nejistota měno, přesnosti měno, přesnosti transformátorů proudu

Nejistota měno, je u měno, proudového transformátoru velmi důležitý parametr a ten je dán především velikostí, magnetizačního proudu a rozptylovými toky magnetického obvodu, což je dobře znázorněno na příhradě schématu transformátoru viz dle uvedeného Obrázek 6, kde je vidíte, že na rozdíl od Rogowského cívky pracující, bez jádra respektive prostě, vzduchu, je tato charakteristika pro proudový transformátor v různých strukturních, a tudíž i ztrátových způsobe... magnetizačním proudem.

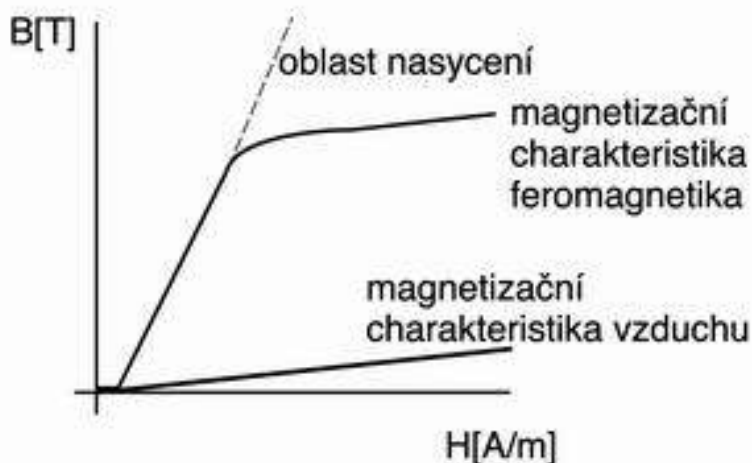


Velikost magnetizačního proudu  $I_m$  závisí, na impedanci sekundárního vinutí, a závisí také a proto se včty snažíme volit ampérmetr a jeho přesnost, aby sekundární napětí,  $U_2$  bylo co nejmenší, f, m se snaží, potěbně magnetický tok na minimum a tím i potřebu daného magnetizačního proudu. Lze transformátor pro danou velikost sekundárního závisí přeskalibrovat, tj. stanovit pracovní bod, pro který je  $I_m$  a konstanta. Dále je pro snášení, ztrát potřebu zajistit aby jádro transformátoru bylo z co nejvyššího feromagnetického materiálu, f, m se oproti snášení, magnetický ztráty zlepšuje, se celková přesnost měření, ho transformátoru.

[2]

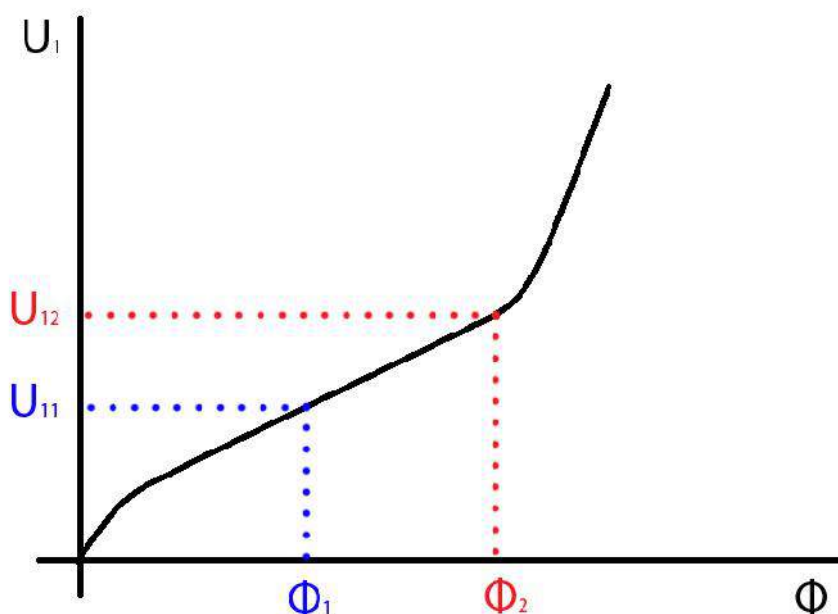
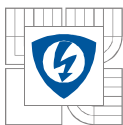


Obrázek 5: Náhled schéma transformátoru zobrazující magnetizační proud (převzato z [5])



Obrázek 6: Magnetizační charakteristiky pro feromagnetické materiály a pro vzduch

Chybu, která je do proudů transformátoru zanesena díky magnetizačnímu proudu je možná snížit a to například pomocí elektronické korekce přesnosti nebo díky zapojení, který kompenzuje magnetizační proud. Dále je možná zvýšení přesnosti měření, ho transformátoru snášením výkonu na kterém je transformátor provozován, f, m dojde ke snížení, přesnosti napětí, a tím i magnetický tok, tedy i magnetizační proudu. To je dobře vidět na charakteristice zobrazené na Obr. 6.



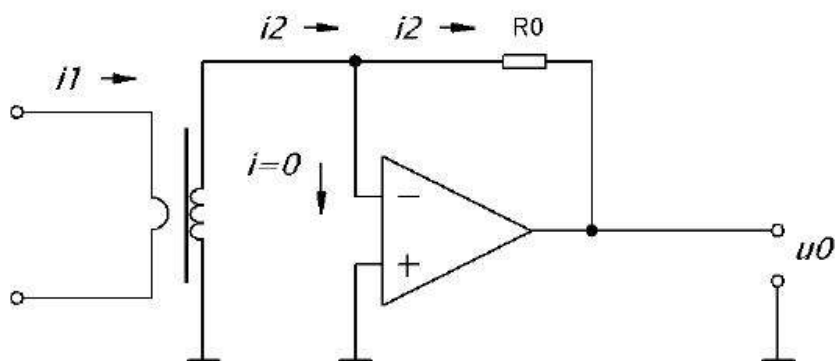
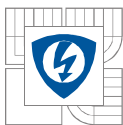
Obrázek 7: Závislost budicího proudu (magnetického toku) na napětí, kresleno z [8]

kde  $\rightarrow_2$  a  $U_{12}$  reprezentuje jmenovitý stav transformátoru a  $\rightarrow_1$  spolu s  $U_{11}$  zobrazují, v jakém pracovním bodě bude možné pracovat transformátor v našem případě, tudíž je patrné, že takto jsme schopni pracovat s lepším, přesností, než je v obecně uváděných 0,1 %

[8] po konzultaci s vedoucím práce

## 2.6 Elektronická korekce přesnosti

Tato varianta má na sekundární straně PTP napojený operační zesilovač. Tím je  $U_2$  a  $I_m$  sníženo na minimum a proto přesnost je výšší, než u klasického typu. Zkrácením přechodu virtuálního, a proud naindukovaný v sekundárního vlnutí, je kompenzován z výstupu operačního zesilovače, jak je zobrazeno na Obrázek 8: Proudový transformátor s elektronickou korekcí přesnosti (převzat [5])



Obrázek 8: Proudový transformátor s elektronickou korekcí přesnosti (převzat [5])

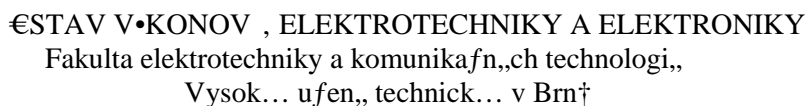
Toto zapojení je vhodné, protože pomocí proud na napětí, podle vztahu 2.1 a tudíž, není, tedy potřebujeme použít buď nějakou nebo jiného elementu, který by do systému zanesl nějakou systematickou chybu. Je důležité zvolit správný převod transformátoru, aby proud sekundárního vinutí nebyl větší, jak maximum, proud z vstupu operačního zesilovače, jinak by hrozilo proudové přetížení, operačního zesilovače. Operační zesilovač je možné chránit dvěma antiparalelními diodami mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem.

$$u_0(t) = -R_0 \cdot i_2(t) \quad (2.1)$$

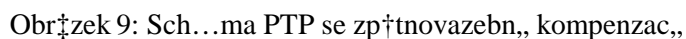
$u_0$  je napětí, vstupu operačního zesilovače,  $R_0$  je odpor mezi invertujícím vstupem a vstupem operačního zesilovače a  $i_2$  je proud indukovaný na sekundární straně magnetického transformátoru.

Toto řešení je jednoduché, které by bylo vhodné pro nějaké aplikace, jelikož poskytuje plně vhodné užití proud na napětí, také eliminaci magnetizačního proudu, díky vlastnostem operačního zesilovače udržovat nulové napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem. Jeho hlavní nevýhoda by mohla spočívat v vyčíslení složitosti možnosti sehnat dostatečně výkonný operační zesilovač, jelikož na kompenzaci proudu bude potřeba okolo 1,41 A, což představuje amplitudu proudu na sekundárního vinutí, našeho transformátoru.

[5]



Princip zaplnovazebn., korekce spof., v $\pm$  vp $\rightarrow$ iveden., kompenzafn., ho proudu, kter $\wedge$  vyru $\text{\textcircled{E}}$ ,  
 ”finky magnetizafn., ho proudu a zajist., tak nulov $\wedge$  magnetick $\wedge$  tok v j $\pm$ d $\rightarrow$ oe transform $\pm$ toru.  
 Magnetizafn., proud je m $\pm$  $\rightarrow$ en $\wedge$  pomocn $\wedge$ nsn., mac., mvinut., m a nesm., j., m prot...kat  $\leftarrow$ dn $\wedge$  proud,  
 z tohoto dŠvodu je pot $\rightarrow$ eba jej zapojit na opera $\wedge$ n., zesilovaf (pou $\leftarrow$ , v $\pm$  se zapojen., na neinvertuj., c.,  
 vstup), kdy vysok $\wedge$  vstupn., odpor opera $\wedge$ n., ho zesilovafe zajist., t...m $\pm$  $\rightarrow$  nulov $\wedge$  prot...kaj, rou $\Phi$   
 pomocn $\wedge$  m sn., mac., m obvodem. V $\wedge$ stupem tohoto opera $\wedge$ n., ho zesilovafe je potom nap $\pm$ t., kter...  
 je p $\rightarrow$ o., mo ”m $\pm$ rn... proudu a kter... je vstupem PI regul $\pm$ toru, kter $\wedge$  ponz $\pm$ novazebn., ho proudu  
 kompenzuje magnetick $\wedge$  tok v j $\pm$ d $\rightarrow$ oe transform $\pm$ toru na nulu. Pro lep $\text{\textcircled{E}}$ , nast., n $\pm$ n., principu je zde  
 p $\rightarrow$ oilo $\leftarrow$ en $\text{\textcircled{sch}}$ ...ma t $\rightarrow$ oto  $\rightarrow$ oe $\text{\textcircled{E}}$ en., Obr $\pm$ zek 9.

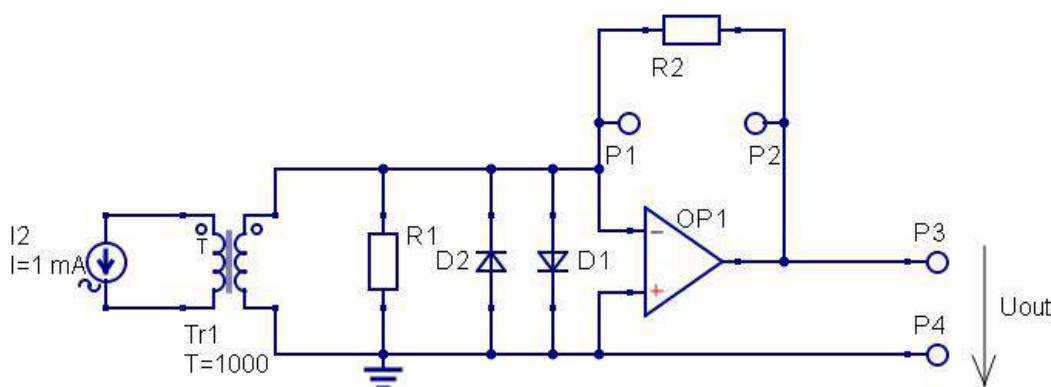


---

23

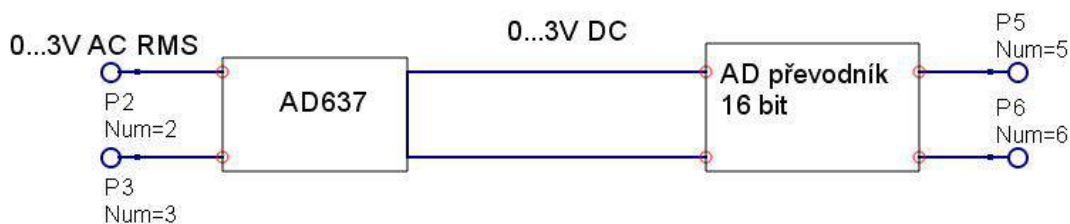
### 3 VLASTNOSTI, VÝHODY A NEVÝHODY

Základním prvkem na výstupu soustavy se stane konstantní zdroj, který bude doplněn za účelem, který bude schopný vysokou přesností, měřit vstupní proud zdroje. Jelikož jsme chtěli porovnat jak vlastnosti proudových transformátorů klasické konstrukce, tak i konstrukce s elektronickou kompenzací, na výstupu bude obsahovat měřící obvod. Způsob, kdy mezi jednotlivými způsoby bude možná pomoc, zkratovací, propojky viz schéma Obrázek 10.



Obrázek 10: Schéma zapojení transformátoru spolu s metodou ziskání napětí ověřovacího signálu

Dále bude potřeba získat napětí ověřovacího signálu. Pracovat do frekvencí řádově 100 kHz bude problematické, protože převodní koefektivní, stávající hodnoty na stejnosměrném napětí, což by bylo vybrané převodní číslo AD637 od firmy Analog Devices a takto získané stejnosměrné napětí, bude dále zpracováno 16 bitovým analog-digital převodníkem, viz schéma Obrázek 11.



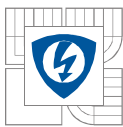
Obrázek 11: Schéma zpracování analogového signálu na signál digitální

#### 3.1 Volba proudového transformátoru

Pro výstřední byl vybrán proudový transformátor od firmy MT Brno s.r.o. se zdánlivým výkonem 15 VA, pod označením 1289 A a z důvodu dostupnosti a nízké rovinné nejistoty měření, která je výrobce uváděna na 0,1 % a takto z důvodu výkonových rezerv, kdy budeme schopni výrobcem uváděnou nejistotu měření, snížit, tak jak bylo popsáno v kapitole 2.5.

[12]





## 3.2 Volba zdroje

Jako zdroj stejnosměrného proudu 1000 A, byl vybrán autotransformátor KPB Intra CTR2 protože vyhovoval požadavkům na výkon a zároveň byl dostupný k zapůjčení, zprostředkovaně laboratoří.

## 3.3 Volba božňšku

Dále bude potřeba převést proud sekundárního vinutí transformátoru na zpracovatelný signál. Za tímto účelem použijeme rezistor ve funkci božňšku.

Při jeho volbě budeme vycházet z výkonu, na kterém budeme provozovat proudový transformátor. Jelikož chceme zveřejnit přesnost sel...ho za...zen, budeme transformátor provozovat na výkonu 1 VA naměřeného jmenovitého 15 VA a to z důvodů, které jsou uvedeny v kapitole 2.5. Vypočet odporu božňškoviz rovnice 3.1.

$$R = \frac{S}{I^2} = \frac{1}{1^2} = 1\Omega \quad 3.1$$

kde R je výsledný odpor božňškov, S reprezentuje výkon, na kterém bude transformátor provozován a I je proud sekundárního vinutí, proudový transformátoru.

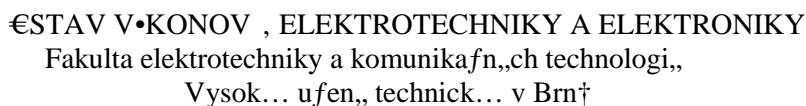
Rezistor, který bude použit jako božňškov, bude nadále muset splňovat podmínku malého teplotního zřívlosti a zároveň mus, být jeho chlazen, natolik přesně dimenzován..., abychom i skrze zřívov výkon, který bude na rezistoru generován, jsme mohli považovat jeho jmenovitou hodnotu jako konstantní. Za tímto účelem je tedy dšle... vypočet, zřívov výkon, viz rovnice 3.2

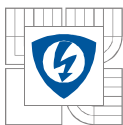
$$P_{zr} = R \cdot I^2 = 1 \cdot 1^2 = 1W \quad 3.2$$

kde  $P_{zr}$  je zřívov výkon generovaný na rezistoru, R je odpor božňškov a I je efektivní, hodnota sekundárního proudu transformátoru.

Vybrali jsme držtový rezistor RX24 50W od firmy Sichuan Yongxing Electronics s hliníkovým obrobáním pouzdem. Tento rezistor je ideální, z hlediska teplotního soufínitele  $T_k=100\text{ppm}/^\circ\text{C}$  a dostupnosti. Zřívov výkon 50W, jsme mohli pravděpodobně volit i menší, ale rozdíl v cenách níže, v koncových částech byly by dšle, tek korunou, bylo v této situaci vhodné koupit rezistor takto přesně dimenzovaný i za vyše, cenu, jelikož tím odpadla nutnost vřofu a následně aplikace dalšího pasivního chlazení. Tato volba je samozřejmě mnohem lepší na kusov... vřob, vřob, padě... řiv... vřoby by byla situace pravděpodobně jšle, indukčnost držtového rezistoru je mnohem... zanedbatelná, z hlediska k tomu, že mřen, bude prováděno vřdy pro s, ovou frekvenci  $f=50\text{Hz}$ , tudě, i hodnota impedance bude vřdy stejná a dš se kompenzovat.

[11]

[illegible]



Přesnost převodu signálu analogového na digitální, pomocí AD převodníku, je určena dvěma parametry a to zejména rozličením, daným převodníkem, a jeho platností, f, v tomto případě je AD převodník přesnější. Pomocí hodnoty rozlišení, jsme schopni zjistit na kolik diskretních hodnot je převodník schopen rozdělit hodnotu napětí ověřovací reference V na celém rozsahu, pak lze použít 16 bitů převodníku, tudíž počet poftu diskretních hodnot je následující, viz rovnice 4.1.

$$p = 2^x = 2^{16} = 65536 \quad (4.1)$$

kde p je počet diskretních hodnot, kterých je převodník schopen rozdělit hodnotu napětí ověřovací reference. Samozřejmě tato hodnota není, nikterak vypovídající, pokud nevíme, na jakém intervalu je daný počet vzorků rozložen. Zmíněvaný interval je určen právě pomocí referenčního napětí, kterých nám vytváříme, horní hranici tohoto intervalu. Vypočet nám potvrdí, že reference probíhá následovně, viz rovnice 4.2.

$$U_{ref} = U_{bočník} \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2 = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2 = 1,697V \quad (4.2)$$

Nejbližší, napětí ověřovací reference, která by vyhověla našim požadavkům je REF5020 od Texas Instruments s napětí ověřovací hladinou 2,048 V, jejíž chyba dosahuje 0,05 %, hladina čemuž je pouze 3 š Vpp/V a má také velmi nízkou tepelnou závislost, 3ppm/°C. Cena této reference je poněkud vyšší, a to 81 Kč, avšak pro naše účely jsme našli levnější variantu, která by poskytovala takovou přesnost jako tato reference.

[15] [17]

Velikost minimálního, rozdílu dvou diskretních hodnot na AD převodník, ku vypočteme podle rovnice 4.3.

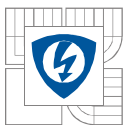
$$U_{krok} = \frac{U_{ref}}{2^{16}} = \frac{2,048}{65536} = 3,125 \cdot 10^{-5}V \quad (4.3)$$

Rozdíl napětí, odpovídající, přesnosti 0,1 % vypočteme, dle rovnice 4.4

$$U_{AW} = I \cdot q \cdot 0,1\% = 1000A \cdot \frac{1V}{1000A} \cdot 0,001 = 1000 \cdot 10^{-5}V \quad (4.4)$$

kdy  $U_{AW}$  představuje námí požadovanou úroveň přesnosti ve voltech, I je proud z proudov...ho zdroje a q reprezentuje převod námí zvolené soustavy proudov...ho transformátoru a bočníku.

Při porovnání, výsledků je naprosto zřejmé, že tato přesnost při dané referenční hodnotě, dostafujícím, pro námí požadovanou přesnost námí zvolený AD převodník, musíme ještě doplnit o externí rezonátor a to o frekvenci 2,4576 MHz, přesně podle požadavků z datasheetu. [17]



### 3.6 Volba operačního zesilovače

Volba operačního zesilovače je závislá především na jeho vstupním proudu, který je schopen dodat. Ten je pro nákladnější, zjednodušeně, proto je operační zesilovač musíme poskytnout stejný proud, jako je indukovaný na sekundárním vinutí proudového transformátoru. Vypočet efektivního proudu, který bude potřebný je zobrazen v rovnici 4.5, pokud bychom uvažovali projektovou rezervu 20%

$$I_{OZ} = I_{sek} \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2 = 1,697 A \quad (4.5)$$

Z rovnice 4.5 vyplývá, že je potřeba zvolit operační zesilovač s vstupním proudem 1,697 A a vyčíst, že nejblíže k tomu je 2 A. Dále je u operačního zesilovače důležité rychlost změny napětí, neboli frekvence přechodu, která nám zajistí, že operační zesilovač bude schopen dostatečně rychle měnit napětí, tak aby se mezi jeho vstupními svorkami udrželo nulové napětí. V neposlední řadě je třeba dále zvážit cenu a dostupnost.

Nakonec, volbou se stal operační zesilovač od Texas Instruments s označením OPA544, jeho vstupní proud je 2 A a frekvence přechodu je 8 V/šs. Z hlediska volby napájecího napětí, operační zesilovač, tak je možné zvolit intervalu >10V až >35V.

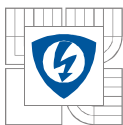
### 3.7 Volba napájecích zdrojů

Námi navrženou soustavu bude nutno nějakým způsobem napájet, a proto je potřeba si nejdříve shrnout jak jednotlivé součásti, bude potřeba napájet, a naopak, jakým proudem. Tyto hodnoty jsou vyneseny v Tab. 2.

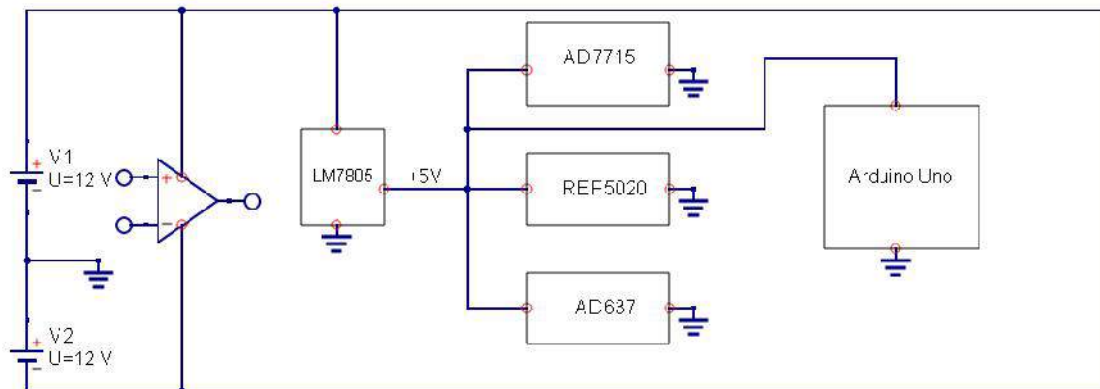
Tabulka 2: Rozpis součástí a jejich napájení,

Zařízení	Napájecí napětí [V]	Napájecí proud [A]
Operační zesilovač OPA544	±12	2
Reference REF5020	5	Zanedbatelný
RMS to DC konverter AD637	5	Zanedbatelný
A/D převodník AD7715	5	Zanedbatelný
Mikrokontrolér Arduino Mega	5	cca 225 mA

Z tabulky 2 vyplývá, že bude zapotřebí dvou 12V zdrojů pro vytvoření +12V a záporného -12V. Napájení, dále, zařazuje nikterak vysoké výkony a tudíž jejich proudy můžeme zanedbat. Vycházíme z toho, že napájení, 5V vstává, a proto je potřeba do schématu zakomponovat lineární, regulační napětí, pro konverzi z 12V na 5V. Za tímto účelem použijeme LM7805.



Celkový popis napájecí soustavy, je patrný ze schématu na Obrázek 13: Napájecí, měřicí, soustavy



Obrázek 13: Napájecí, měřicí, soustavy

Zdroje zvolíme RS-35-12 od firmy Meanwell, poskytneme tento 12V model měřicího vstupu, proud 3A, f, m nřm i p%oi napřjen,, odbřru 2A do operařn,,ho zesilovaře poskytneme dostateřnou vřkonovou rezervu pro napřjen,, ostatn,,ch mřřc,,ch zařř,,. Byla zde mořnost zakoupen,, zdroje S-25 s napřřt,,m 12V a proudem 2,1A, kterř by pravřřpodobnř byl tak... dostafuj,,c,, uřřvodu projektov... rezervy p%oi volbř operařn,,ho zesilovaře 0,3A, vřhledem k cenov...mu rřřdu, lu pohybuj,,c,,mu se okolo 40 Kř na jednom kusu, je pro nřřř p%oi, pad kusov... vřroby vřhodnřřř, volit vyřřř, napřřjec,, rezervy a tud,,< zdroj RS-12. V s...riov... vřrobř byanozřřejmř byla volba sprřřvn...ho zdroje podstatnř zřřsadnřřř, a se znřřmřm pořřtem finřřln,,ch komponent by se volila ekonomicky p%oiřatelnřřř, varianř. Volbou extern,,ho zdroje je třřeba pamatovat na to, ře na desce plořřn...ho spoje bude třřeba vyv...st napřřjec,, skvřřř napřřjen,, jedřřřle třřeba si pohl,,dat hodnoty zřřřřov...ho vřkonu na lineřřrn,,m regulřřřtoru LM7805.

Dalřř, variantou p%oiřřř, p%oi nřřřřu 5V napřřjen,, je vyuřřt 5V regulřřřtoru p%oi, mo z mikrokontrol...ru Arduino. Tato varianta je vřhodnřř v p%oi, padřř, ře nebudeme p%oiřřř 12V napřřjen,, a tud,,< cel... zařř,,zen,, budeme schopni napřřjet pomoc,, jednoho zdroje napřřřc,, mikrokontrol...r.

## 4 ZAPOJENÍ KOMPONENT

Jednotlivé mikrofony mají mnoho možností, pro zapojení a v následujících kapitolech jsou diskutovány vlastnosti jednotlivých vstupů a výstupů. Dále představíme možnosti použití zapojení,

### 4.1 Zapojení RMS to DC převodníku

Tato komponenta bude zapojena podle schématu na Obr. 14. K samotnému převodníku bude třeba přidat kondenzátor  $C_2$ , přímý proudovou konstantu a další dva kondenzátory, které budou sloužit jako filtry vstupního signálu. Velikost přímého proudu,  $I_{bias}$ , konstanty, tudíž velikost kondenzátoru  $C_{AV}$  vyčteme z grafu na Obr. 15. Pro naši používanou frekvenci 50 Hz a směrnicí s chybou 0,01% a dostaneme příbližnou hodnotu 5  $\mu F$ . Velikost ostatních dvou filtračních kondenzátorů je odvozena od velikosti  $C_{AV}$  a platí mezi nimi vztah 4.2, tudíž nám vyjde, že kondenzátory  $C_2$  a  $C_3$  budou mít kapacitu 10  $\mu F$ . Pro nádobu použijeme keramické kondenzátory z důvodu jejich nízké parazitní indukčnosti.

$$C_2 = C_3 = 2 \cdot C_{AV} = 2 \cdot 5 = 10 \sim F \quad (4.2)$$

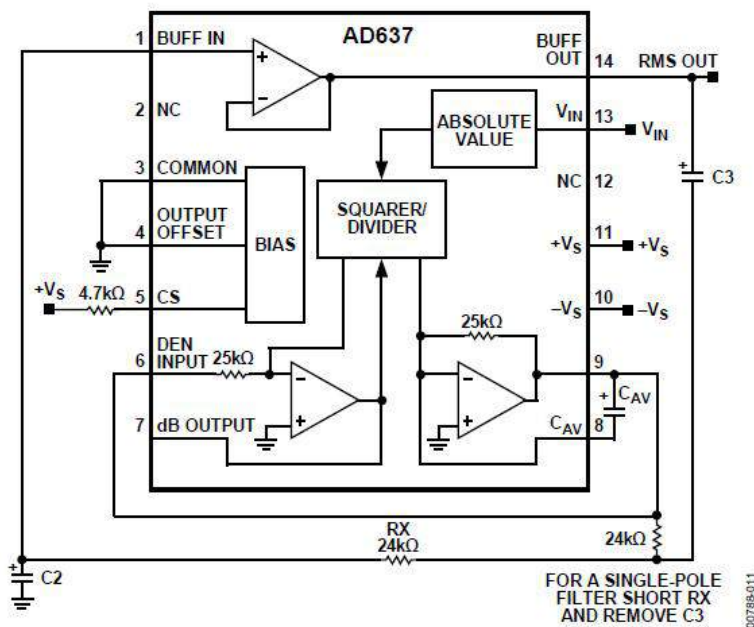
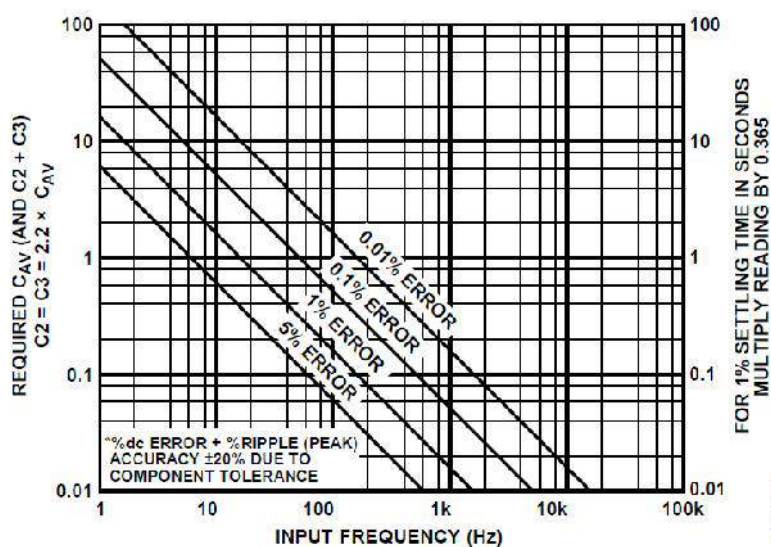
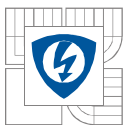


Figure 11. 2-Pole Sallen-Key Filter

Obrázek 14: Zapojení, RMS to DC převodníku (převzato z [14])



Obrázek 15: Graf pro určení velikosti kondenzátoru  $C_{AV}$  na základě frekvence a požadované chyby (převzato z [14])

## 4.2 Zapojení napávacího reference REF5020

Zapojení napávacího reference REF5020 bude probíhat podle datasheetu v obvodu Obr. 16. Pin na vstupní, napávací, a zem bude oddělen kondenzátorem 10  $\mu\text{F}$  pro co nejvyšší stabilitu vstupní, napávací. Ze stejného důvodu umístění kondenzátor i mezi pin referenční, napávací, a zem, tentokrát o hodnotě 50  $\mu\text{F}$ .

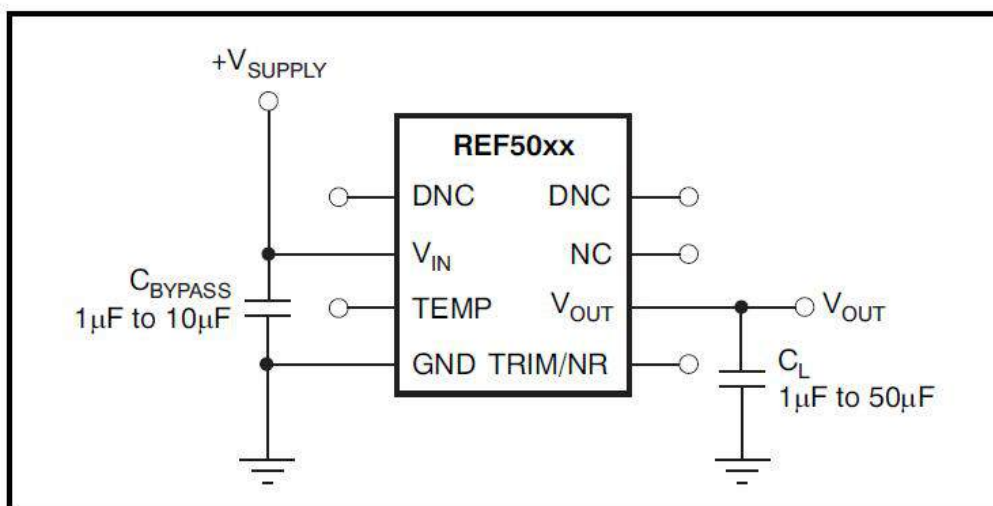
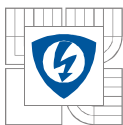


Figure 29. Basic Connections

Obrázek 16: Zapojení napávacího reference REF5020 (převzato z [15])

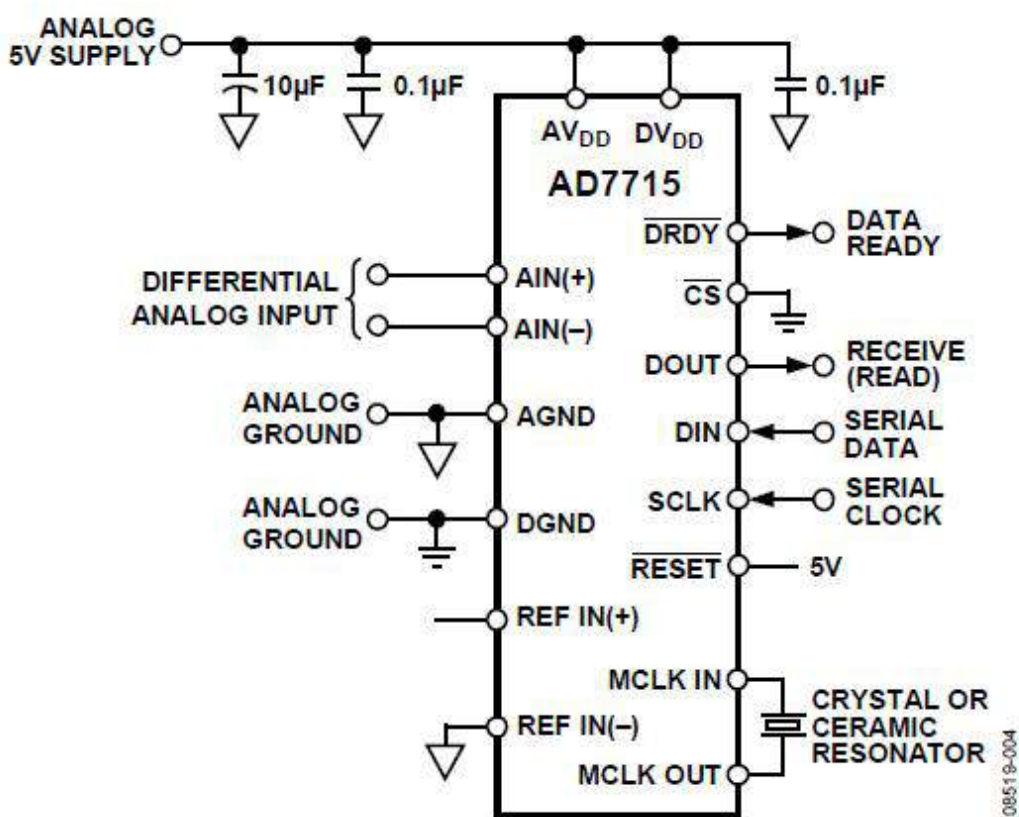




### 4.3 Zapojení A/D převodníku AD7715

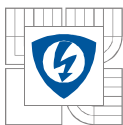
Zapojení, analog-digitální převodníku bude probíhat podle Obr.17.

Stabilita napájecího napětí, je zde zajištěna pomocí kondenzátorů 10  $\mu\text{F}$  dvakrát 0,1  $\mu\text{F}$ . Pokud je kondenzátor 10  $\mu\text{F}$  elektrolytický a kondenzátory 0,1  $\mu\text{F}$  jsou keramické....Mezi pin MCLK IN a MCLK OUT bude zapojen rezonátor 2,4675 MHz. Dále je důležité... vytvořit dvě nezávislé země, které jsou od sebe odděleny a jsou spojeny pouze v jednom místě a to z důvodu zamezení, rušení, mezi analogovým a digitálním obvodem. Pokud je potřeba digitální signály se vyznačují, velmi rychlými nabíjecími hranami (v ideálním případě jednotkový skok) a potřeba tato rychlá časová změna proudu za čas, může způsobit naindukování, rušení, do analogových obvodů.



Obrázek 17: Zapojení, analog-digitální převodníku AD7715 (převzat z [17])





## 5 N,VR H A KONSTRUKCE

Tato kapitola se zabývá návrhem plošného spoje v CAD softwaru EAGLE a následně osazením plošného spoje součástkami. V této práci jsou popsány dva možné návrhy, které se od sebe liší, získem napájení signálu. První, méně padě bude pro získání napájení signálu využít pouze boční, a druhá varianta obsahuje všechny popsanou kombinaci boční, ku a operační, zesilovače. Varianta obsahující, boční, je zřejmě „spornější“, jelikož nebude potřeba nákup dvou napájecích zdrojů, operační, zesilovače a tak... nebude potřeba použít, lineární, regulátoru napětí, z 12V na 5V, jelikož všechny započtené, napětí jen pomocí 5V zdroje.

Pro sestavení, finálního, soustav jsme zvolili variantu bez operační, zesilovače, jelikož se nám během očištění, nepodařilo odstranit samovolné kmity operační, zesilovače, kompenzující, vstup proudů... transformátoru.

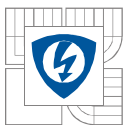
Důležitým faktorem při návrhu plošného spoje byl fakt, že se jedná o vysokofrekvenční, obvod s kmitočty v řádu jednotek MHz, tudíž je třeba respektovat, aby cesty nebyly vedeny do pravého hluku, jinak by mohlo dojít k indukci, rušivého signálu. Je potřeba respektovat, aby jednotlivé součástky byly co nejblíže, aby se snížili parazitní, indukčnost a kapacita obvodu, který by mohl napáklad způsobit problém... komunikaci mezi mikrokontrolerem a převodníkem, kdy by mohlo docházet k zamezení fi neostraněm hranic jednotlivých bitů.

### 5.1 První varianta elektrického schéma

Elektrické schéma je rozděleno do dvou částí,:

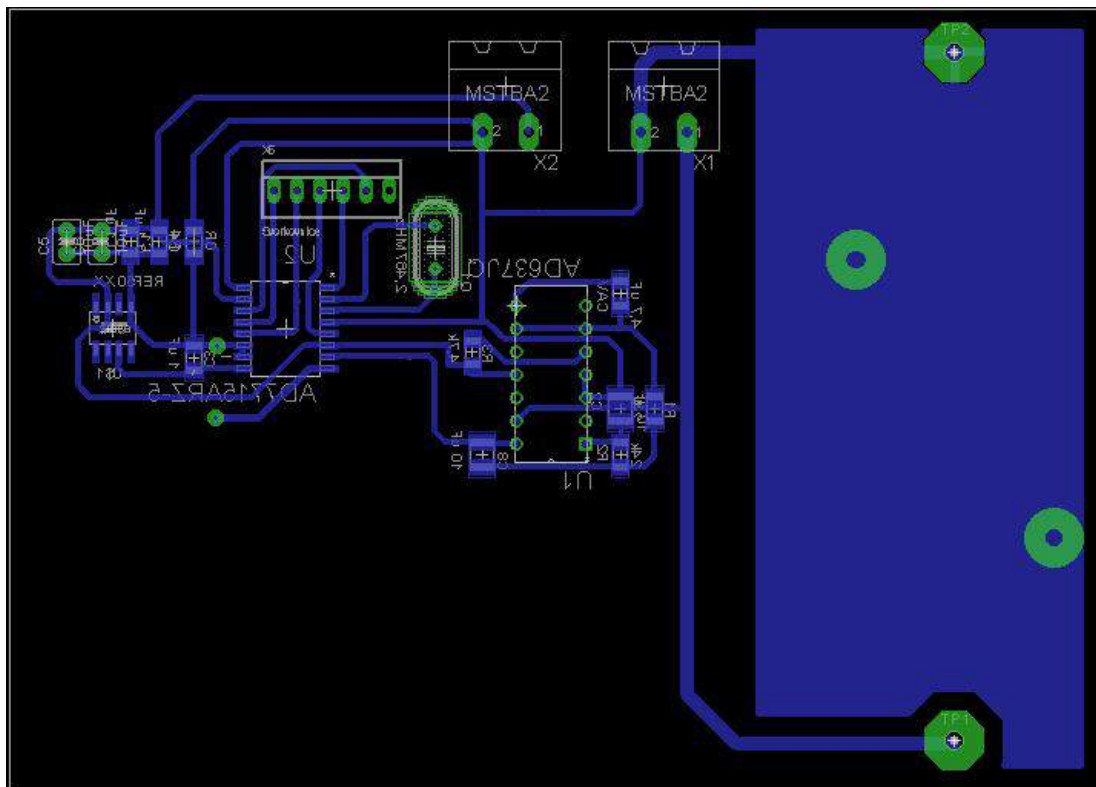
- Získání napájení signálu z boční, ku a zapojení, RMS to DC konvertoru
- Převod analogového signálu na digitální,

Tyto jednotlivé části jsou součástí, pomocí, toho, to práce.



## 5.2 První varianta- deska plošného spoje

Návrh desky plošného spoje je zobrazen na Obr.18. Jelikož v tomto návrhu nebylo použito operačního zesilovače, lineárního regulátoru a propojovacích svorek, bylo možné tento návrh realizovat na jednovrstvém cuprexu.



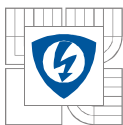
Obrázek 18: Návrh desky plošného spoje pro variantu bez operačního zesilovače

## 5.3 Druhá varianta - elektrická schéma

Elektrická schéma je rozděleno do tří částí:

- Zisk napávacího signálu z bočníku a operačního zesilovače
- Zapojení RMS to DC konvertoru
- Převod analogového signálu na digitální,

Tyto jednotlivé části jsou součástí celého projektu.

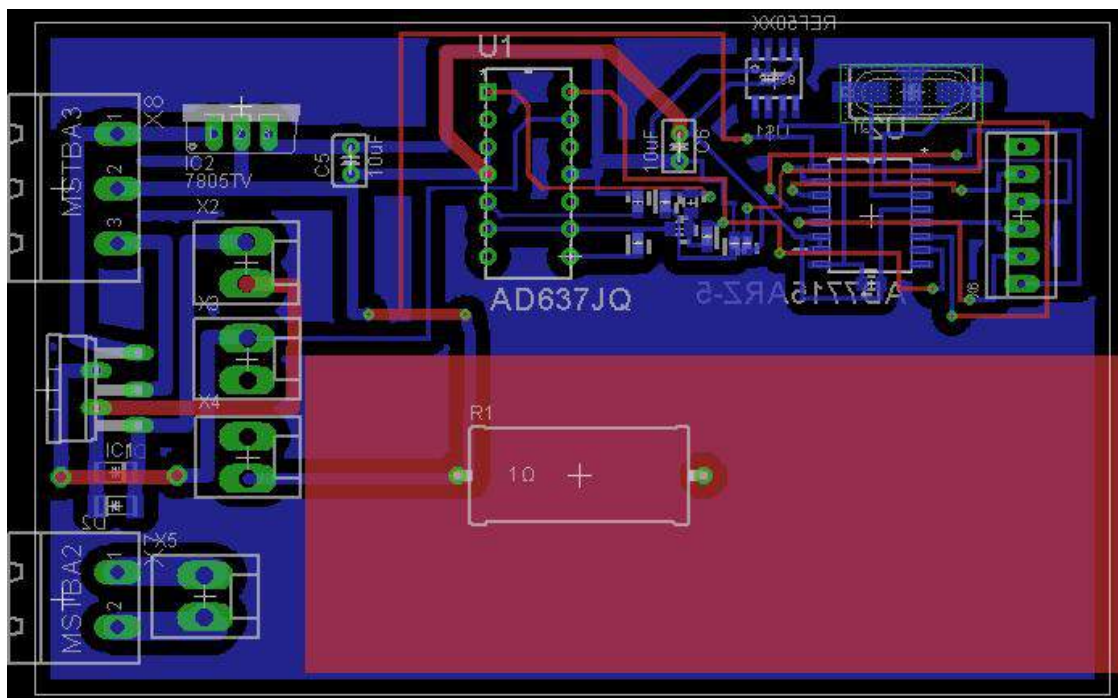


## 5.4 Druhá varianta - deska plošného spoje

Návrh druhé desky plošného spoje zobrazen na Obr.19. Bude použito oboustranné mědi a to pro zvýšení výkonu vyřešení, pokud použijeme soufázový výkon, fázový výkon bude sloužit k montáži výkonového rezistoru RX24 50W.

Legenda:

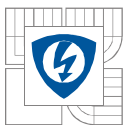
- červená plocha - horní, vrstva
- Modrá plocha - spodní, vrstva
- Zelená plocha - kontakty



Obrázek 19: Návrh desky plošného spoje variantu s operačním zesilovačem

## 5.5 Návrh komunikace

Jak bylo popsáno výše, digitální data bude potřeba zpracovávat nejprve do SI jednotek. Za tímto účelem využijeme mikrokontrolér Arduino Mega, který bude data zpracovávat a zobrazovat na display. Podle datasheetu AD7715, bude komunikace pomocí SPI (Serial Peripheral Interface), což není, zcela ideální, protože je potřeba konfigurace registrů a komunikace je obecně složitější, například oproti I2C rozhraní. Mějte na tuto skutečnost vyhrazený procesor. [17]



Komunikace probíhá po špičce

- DRDY - data ready
- CS - chip select
- DIN - digitální vstup
- DOUT - digitální výstup
- SCLK - seriální clock
- RESET - reset

Pokud není zapojen, je CS permanentně uzemněn, jelikož AD převodník je připojen pouze na jedno záporné.

Ukázka komunikace principu komunikace je zobrazena na Obr.20.

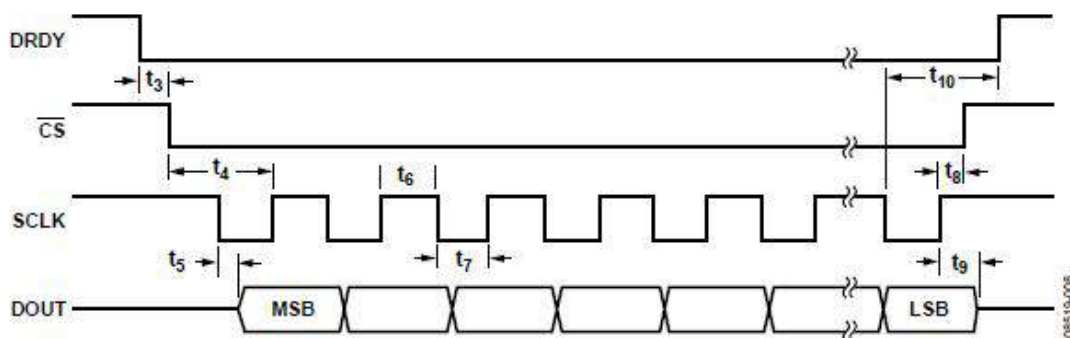


Figure 8. Read Cycle Timing Diagram

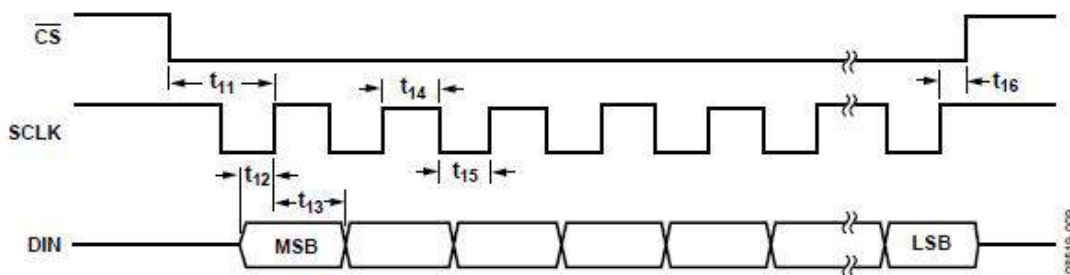
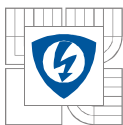


Figure 9. Write Cycle Timing Diagram

Obrázek 20: Ukázka komunikace AD převodníku AD7715 (převzato z [17])



## 5.6 Kód komunikace z mikrokontrolerem

V kódu je použita knihovna <SPI.h>, která je nativní součástí, Arduino IDE. Komunikace mezi mikrokontrolerem a převodníkem AD7715, zatím nebyla žádnou knihovnou nijak vyřešena a tak bylo potřeba tuto komunikaci zvlášť napsat na číselný řádek. Kód je psán v programovacím jazyce Wiring, který vychází z programovacího jazyka C. Základem celého programu jsou dvě funkce a to void setup(), která proběhne pouze jednou, a během které dojde k pořízení, mu nastavení, mikropočítače nastavení, registrů AD převodníku. Dále je zde funkce void loop(), která se cyklicky opakuje a tím, zajišťuje periodické čtení, dat. Dále, dšlečí funkce funkce void readFromADCDataRegister(), která zajišťuje samotné čtení, z AD převodníku a je volána první v opakujícím se řádku kódu.

Kód mikrokontroleru:

```
#include <SPI.h>

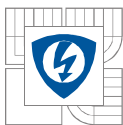
const int dataReadyPin = 3;
const int reset = 2;
int i=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  SPI.begin();
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  SPI.setDataMode(SPI_MODE3);
  SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16);

  pinMode(dataReadyPin, INPUT);
  pinMode(reset, INPUT);

  setupADC();
}

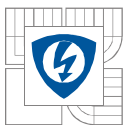
void setupADC()
{
  int SPIV;
  digitalWrite(reset, LOW);
  delay(1);
  digitalWrite(reset, HIGH);
  Serial.print("SPI.transfer return: ");
  SPIV = SPI.transfer(0x10);
  Serial.print(SPIV);
  SPIV = SPI.transfer(0x68);
  Serial.print(" ");
  Serial.println(SPIV);
}
```



```
void readFromADCDataRegister()  
{  
  
    long adcRead1, adcRead2;  
    if (!(digitalRead(dataReadyPin)))  
    {  
        Serial.print("adcRead: ");  
        SPI.transfer(0x38);  
        delay(1);  
        adcRead1 = SPI.transfer(0xFF); // read the 1st byte  
        delay(1);  
        adcRead2 = SPI.transfer(0xFF);  
        Serial.print(adcRead1, DEC);  
        Serial.print(" ");  
        Serial.print(adcRead2, DEC);  
        Serial.print(" ");  
        Serial.print(adcRead1, BIN);  
        Serial.print(" ");  
        Serial.print(adcRead2, BIN);  
  
        adcRead1 <= 8;  
        adcRead1 |= adcRead2;  
        Serial.print(" ");  
        Serial.println(adcRead1, BIN);  
    }  
}  
  
void loop()  
{  
    readFromADCDataRegister();  
}  
  
[19]
```

## 5.7 Zpracování dat z mikrokontroleru

Dekadickou hodnotu, která je mikrokontrolerem poslána na seriovou linku do PC, je nutné takto uživatelsky interpretovat. Získané údaje byly naprogramováno rozhraní, v programovacím jazyce Python. Dále bylo zprovozněno zavedení mediátoru do výpočtu hodnoty proudu. Mediátor je vypočítán ze sta hodnot a tímto se omezuje vliv umělého mřížového

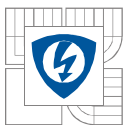


Kód pro PC:

```
import serial          # umožní nam použít pyserial
import os
import time
from collections import defaultdict

def median(aData):
    setrizeno = sorted(aData)
    delka = len(setrizeno)
    if not delka % 2:
        return (setrizeno[delka / 2] + setrizeno[delka / 2 -
1]) / 2.0
    return setrizeno[delka / 2]

rx = 0
data = []
com = serial.Serial(5) # inicializace portu COM
while 1:
    data = []
    # do promenne rx nacte vse co je ve vstupnim bufferu az
do enteru
    # uzavre port
    nb = raw_input()
    for i in range(100):
        com.write("n")
        #time.sleep(0.001)
        rx = com.readline()
        data.append(int(rx))
        #print (median(data))
    print (median(data) * 0.000069427490234375)
    del data
com.close()
```



## 6 V-POČET TEORETICKÝ PŘESNOSTI / NEJISTOTY SOUSTAVY

V úvodu by bylo dobré zdůraznit, že termín přesnost fyzikální není, zcela správný termín a mělo by se používat termín nejistota měření. Následující, čímž se nová terminologie jedná o nejistotu typu B, která se na rozdíl od nejistoty typu A nezakládá na statistické měření.

[20]

Nejistota soustavy typu B se skládá z nejistoty jednotlivých prvků. Nejistoty jednotlivých prvků jsou rozepsány v Tab.3. V tabulce je také uvedena teoretická nejistota pro níže zvolený proudový transformátor, kdy využijeme zjednodušení, jehož předpokladem, že nejistota proudového transformátoru klesá, čímž se sníží provozní zdánlivý výkon transformátoru, jak bylo napsáno v kapitole 2.5. Všechny teoretické nejistoty jsou uvedeny ve vztahu 6.1.

$$u_{B\_IVA} = \frac{S_{použít}}{S_{nominální}} \cdot u_{B\_nominální} = \frac{1}{15} \cdot 0,5 = \frac{1}{30} = 0,0333\% \quad (6.1)$$

Tabulka 3: Tabulka přesností, dle jednotlivých prvků

Tabulky třídy přesnosti (převzato z [14,15,17])	
Prvek	Třída přesnosti [%]
Proudový transformátor - přepočtený	0,0333
AD převodník AD7715	0,0015
RMS to DC převodník AD637	0,02
REF5020	0,05

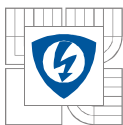
Jak je napsáno výše, celková přesnost systému je geometrickou součtu dle jednotlivých prvků, tudíž celková přesnost soustavy je vypočtena rovnicí 6.2

$$u_B = \sqrt{u_{B\_IVA}^2 + u_{B\_AD7715}^2 + u_{B\_AD637}^2 + u_{B\_REF5020}^2} \quad (6.2)$$

$$u_B = \sqrt{0,0333^2 + 0,0015^2 + 0,02^2 + 0,05^2} = 0,06333$$

Podle rovnice 6.2 je vidět, že teoretická přesnost měření soustavy bude 0,0633





## 7 OV, 'EN€ P'ESNOSTI /NEJISTOTY SOUSTAVY

Pro ověření, přesnosti... soustavy bylo sestaveno... popis... , protože zmínou, že jsme si sekundární, vinutí, proudového transformátoru nahradili zdrojem ve formě autotransformátoru značky Thalheim typ EES 100 10A a to hlavně z ekonomických důvodů, aby nebylo nutné kvůli jednomu měření, kupovat návrhu popsaný proudový transformátor, pro který by dále nebylo možné využít... Pro zachování relevantnosti výsledků budou uvedeny dva typy nejistot typu A, jedna vycházející, první ze statistického měření, a druhá bude obsahovat chyby, c., nejistotu, kterou by to syst...mu vnesl proudový transformátor jako referenční, měřidlo bylo použito Fluke 8845A, jeho kalibrační list je součástí, přeložené výsledky měření, a poftš jsou uvedeny v následujících tabulkách.

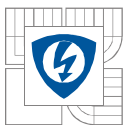
### 7.1 Tabulky výsledků

Tabulka 4: Legenda naměřených a vypočtených hodnot

Označení	Slovní popis
$I_{2\_REF}$	Referenční proud změřený pomocí Fluke 8845A
$N$	Dekadická hodnota z AD převodníku
$I_C$	Hodnoty proudu vypočtené z hodnot naměřených demonstrátorem
$I_1$	Proud primárním vinutím
$\overline{N}$	Střední hodnota dekadické hodnoty z AD převodníku
$\overline{I_{2\_REF}}$	Střední hodnota změřeného referenčního proudu
$\overline{I_C}$	Střední hodnota proudu vypočteného z hodnot naměřených demonstrátorem
$\sigma_{I_C}^2$	Rozptyl z hodnot proudu vypočtených z naměřených hodnot
$u_{A\_I_C}$	Nejistota typu A proudu vypočteného z hodnot naměřených demonstrátorem
$u_{A\_I_C-2}$	Nejistota typu A proudu respektující nejistotu, kterou by do systému vnesl námi vybraný proudový transformátor
$u_{I_C}$	Rozšířená nejistota soustavy
$K$	Korekce

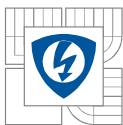
Tabulka 5: Konstanty pro výpočet

Označení a jednotka	Slovní popis	Hodnota
$U_{REF} [V]$	Napěťová reference	4,55
$k [A]$	Hodnota jednoho dílku	0,000069427490234375
$k_2 [A]$	Maximální zvolený rozsah	1



Tabulka 6: Naměřené... a vypočtené... hodnoty

$I_{2\_REF} [A]$	$N [-]$	$I_C [A]$
0,00064	4	0,00028
0,00064	39	0,002708
0,00064	27	0,001875
0,00064	34	0,002361
0,00064	20	0,00139
0,20165	2906	0,201756
0,20166	2903	0,201548
0,20355	2912	0,202173
0,20633	2942	0,204256
0,20079	2882	0,20009
0,40455	5837	0,405248
0,40554	5822	0,404207
0,40646	5858	0,406706
0,40634	5845	0,405804
0,40638	5868	0,407401
0,60876	8744	0,607074
0,60876	8738	0,606657
0,60873	8741	0,606866
0,60832	8780	0,609573
0,60823	8741	0,606866
0,80457	11584	0,804248
0,80457	11575	0,803623
0,80454	11594	0,804942
0,80460	11591	0,804734
0,80560	11616	0,80647
1,00136	14438	1,002394
1,00135	14403	0,999964
1,00136	14424	1,001422
1,00136	14437	1,002325
1,00135	14433	1,002047



Tabulka 7: Nameřené a vypočtené hodnoty 2

$\overline{I}_C$ [–]	$\overline{N}$ [–]	$\overline{I_{2\_REF}}$ [A]	$\sigma_{I_C}$ [mA]	$u_{A\_I_C}$ [%]	$u_{A\_I_C-2}$ [%]	$u_{I_C}$ [%]	$K$ [mA]
0,001055	15,2	0,00064	1,79266	0,17927	0,18233	0,19302	-0,417
0,201965	2909	0,20279	1,50195	0,1502	0,15384	0,16637	0,827
0,405873	5846	0,40585	1,24486	0,12449	0,12886	0,14359	-0,019
0,607407	8749	0,60856	1,21983	0,12198	0,12645	0,14142	1,153
0,804803	11592	0,80477	1,0609	0,10609	0,11119	0,12797	-0,03
1,00163	14427	1,00135	1,0073	0,10073	0,10609	0,12356	-0,276

## 7.2 Příklad výpočtu:

Číselné hodnoty odpovídají poslednímu řádku a v případě výpočtu středních hodnot, rozptylu a nejistoty typu B se jedná o hodnoty z posledních pěti řádků. V případě rozptylu, je výpočet pouze naznačen, z důvodu délky zápisu.

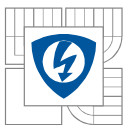
$$I_C = k \cdot N = 0,000069427490234375 \cdot 14433 = 1,002047 \text{ A} \quad (7.1)$$

$$\overline{I}_C = \frac{\sum I_C}{n} = \frac{1,002394 + 0,999964 + 1,001422 + 1,002325 + 1,002047}{5} = 1,00163 \text{ A} \quad (7.2)$$

$$\overline{N} = \frac{\sum N}{n} = \frac{14438 + 14403 + 14424 + 14437 + 14433}{5} = 14427 \quad (7.3)$$

$$\overline{I_{2\_REF}} = \frac{\sum I_{2\_REF}}{n} = \frac{1,00136 + 1,00135 + 1,00136 + 1,00136 + 1,00135}{5} = 1,00135 \text{ A} \quad (7.4)$$

$$\sigma_{I_C} = \sqrt{\frac{\sum (I_C - \overline{I}_C)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{(1,002394 - 1,00163)^2 + \dots + (1,001345 - 1,00163)^2}{4}} = 1,0072969 \text{ A} \quad (7.5)$$



$$u_{A-I_C} = 2 \cdot \frac{\sigma_{I_C}}{k_2} \cdot 100 = \frac{0,0010072969}{1} \cdot 100 = 0,10073 \% \quad (7.6)$$

$$u_{A-I_C-2} = \sqrt{u_{A-I_C}^2 + u_{B-IVA}^2} = \sqrt{0,10073^2 + 0,0333^2} = 0,10609 \% \quad (7.7)$$

$$u = \sqrt{u_{A-I_C-2}^2 + u_B^2} = \sqrt{0,106091^2 + 0,0633^2} = 0,12356 \% \quad (7.8)$$

$$K = I_{2\_REF} - I_C = 1,001354 - 1,00163 = -0,276 \text{ mA} \quad (7.9)$$

Tabulka 8: Tabulka měřících přístrojů

Typ přístroje	Výrobce	Název	Sériové číslo
Multimetr	Fluke	8845A	9564012
Laboratorní stůl	Diametral	---	654VUT5020
Oscikoskop	Tektronix	TPS 2012B	TPS2012B C010718
DC zdroj	Diametral	---	74315DC23

### 7.3 Grafické zobrazení naměřených výsledků

Grafy porovnávající proud změřený referenčním měřidlem, proud změřený naším demonstrátorem a graf zobrazující korekční křivku jsou součástí příloh této práce.

### 7.4 Adjustace výpočtů proudu demonstrátorem

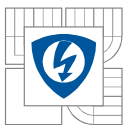
Pomocí námi naměřených hodnot jsme schopni adjustovat rovnici přímky, podle které se mikrokontrolér vypočítává výslednou hodnotu proudu.

Ideální rovnice přímky viz rovnice 7.10

$$I_C = \frac{U_{REF}}{\text{ROZLIŠENÍ AD PŘEVODNÍKU}} \cdot N = \frac{4,55}{2^{16}} \cdot N = 6,942749023 \cdot 10^{-5} \cdot N \quad (7.10)$$

Rovnice přímky získaná lineární aproximací naměřených hodnot z referenčního měřidla viz rovnice 7.12, rovnice byla vygenerována programem Excel 2013

$$I_{2\_REF} = 6,942088655 \cdot 10^{-5} \cdot N - 2,5175953495 \cdot 10^{-4} \quad (7.12)$$



Dále máme rovnici přímky získanou lineární aproximací hodnot naměřených naším demonstrátorem, viz rovnice 7.13, rovnice byla vygenerována programem Excel 2013

$$I_C = 6,942731508 \cdot 10^{-5} \cdot N - 1,2215482678 \cdot 10^{-6} \quad (7.13)$$

Pokud chceme vypočítat adjustační koeficient alfa je potřeba podělit směrnici přímky referenčního měřidla (rovnice 7.12) směrnici přímky ideální rovnice (rovnice 7.11), tak jak naznačeno v rovnici 7.14

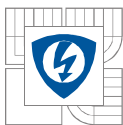
$$\alpha = \frac{k_{2\_REF}}{k_{IDEÁLNÍ}} = \frac{6,942088655 \cdot 10^{-5}}{6,942749023 \cdot 10^{-5}} = 0,9999048838 \quad (7.14)$$

Nyní, když máme adjustační koeficient, tak můžeme upravit rovnici přímky v mikrokontroléru a tím bychom měli získat co nejpřesnější hodnoty z našeho přípravku. Adjustovaná rovnice je sepsána v rovnici 7.15

$$I_{ADJUST} = \alpha \cdot I_{IDEÁLNÍ} \cdot N - q_{2\_REF} \quad (7.15)$$

$$I_{ADJUST} = 0,9999048838 \cdot 6,942749023 \cdot 10^{-5} \cdot N - 2,5175953495 \cdot 10^{-4}$$

$$I_{ADJUST} = 6,942088655 \cdot 10^{-5} \cdot N - 2,5175953495 \cdot 10^{-4}$$

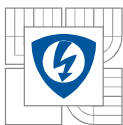


## 8 ZEVNĚ

V bakalářské práci se podařilo splnit všechny body zadání, přičemž kapitoly jsou teoreticky rozebrány, možnosti měření, vysokých proudů a je zde zvolena finální, metoda, která byla využita pro stavbu diskutovaného demonstrátoru. Následně je detailně popsán teoretický návrh a konstrukce sestavy s odvedením, m volby jednotlivých prvků. Těto, první práce se zabývají vzhledem nejistoty typu B pro zvolenou sestavu, kdy výsledkem je  $u_B = 0,0633\%$ . Poslední, poslední práce měla za cíl ověřit reálnou hodnotu nejistoty, kdy sestavený demonstrátor při jmenovitých parametrech dosahoval hodnoty  $0,10609\%$  pro nejistotu typu A a hodnoty  $0,12356\%$  pro rozloženou nejistotu měření.

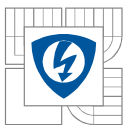
Samotná konstrukce přístroje byla provádná v několika variantách, než se podařilo odstranit jak chyby v návrhu, tak chyby při vypracování. Zásadně, a zároveň nejproblematictější, součástí návrhu se stal 16 bitový analog-digital převodník AD7715, u kterého při ošivování, komunikace mezi mikrokontrolérem a převodníkem i přes správně nastavený registr převodníku, nebylo možné. Zkusím postupně, ho pinu DRDY nulovou hodnotu. Tím by započalo posílení, dat z převodníku do mikrokontroléru. Následně bylo dosaženo ke zjištění, že převodník byl poškozen nespojením zemí, mezi převodníkem a mikrokontrolérem. Než byla tato chyba odhalena, byly zničeny dva převodníky. Při ošivování, komunikace bylo dále zjištěno, že vzdálenosti mezi převodníkem a procesorem mikrokontroléru, respektive pinů MOSI/MISO, byla zbytečně dlouhá, což mělo za následek vysokou parazitní kapacitu vodičů, která se projevovala zřetelně jednotlivých komunikačních bitů.

Hodnoty nejistoty byly ovlivněny problémem, který nastal špatnou referencí, pro AD převodník, kdy hodnota jejího vstupu byla  $4,55\text{ V}$  namísto jmenovitých  $2,048\text{ V}$ , což v konečném důsledku dvojnásobně snížilo rozlišení, AD převodníku. Dále se dalo předpokládat, že demonstrátor by dosahoval lepších parametrů při použití, proudového transformátoru kompenzovaného operací, zesilovatelem, jak bylo převodníkem zamýšleno. Jak je však zřejmé, tato varianta nebyla dokončena, protože se nepodařilo zamezit samovolným kmitům operace, zesilovatele. Velice vhodný prvek, který zajišťuje snižení, vlivu úniku, tedy i snižení, nejistoty demonstrátoru, je samostatný vypočet proudu z dané hodnoty, pomocí funkce pro střední hodnotu, která je implementována v kódu zpracovávajícího data z mikrokontroléru.



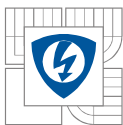
## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Datasheet HMC5883L*. Plymouth, 2013. Dostupné z:  
[http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/HMC5883L\\_3-Axis\\_Digital\\_Compass\\_IC.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf) LÁČÍK
- [2] POPEK, Jiří. *POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A PROUDOVÝCH SENZORŮ*. Brno, 2010. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26561](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26561).  
Bakalářská práce. VUT FEKT Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Ing. David Topolánek.
- [3] Solarski robotics. *Solarski robotics* [online]. [cit. 2014-11-15]. Dostupné z:  
<http://www.solarskit.wz.cz/source/elt/alarms/princip.gif>
- [4] Automatizace HW. VOJÁČEK, Antonín. [online]. 2007. vyd. [cit. 2014-11-16]. Dostupné z:  
<http://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>
- [5] VACULÍK, VLASTIMIL. *SNÍMAČE PROUDU*. Brno, 2011. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=56996](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56996).  
Diplomová práce. VUT FEKT Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce DOC. DR. ING. MIROSLAV
- [6] CHAUVIN-ARNOUX. *Datasheet*. 2014. Dostupné z: [http://www.chauvin-arnoux.com/catalogues/pdf/PTM/CAT\\_UK\\_pinces2014.pdf](http://www.chauvin-arnoux.com/catalogues/pdf/PTM/CAT_UK_pinces2014.pdf)
- [7] GMW Associates [online]. 2014 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z:  
[http://www.gmw.com/electric\\_current/LEM/IT60-1000-S-Pricing.html](http://www.gmw.com/electric_current/LEM/IT60-1000-S-Pricing.html)
- [8] GROSS, Boleslav. *Laboratorní a numerická cvičení z elektrických přístrojů*. 1. vyd. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1983.
- [9] Current Transducers. DIGI-KEY CORPORATION. *Digi-Key Corporation* [online]. 2014. vyd. 2014 [cit. 2014-11-28]. Dostupné z:  
<http://www.digikey.com/product-search/en?mpart=20311000101&vendor=1195>
- [10] LEM: Model details. LEM. LEM [online]. [cit. 2014-11-28]. Dostupné z:  
[http://www.lem.com/hq/en/component/option,com\\_catalog/task,displaymodel/id,71.36.60.001.0/](http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymodel/id,71.36.60.001.0/)
- [11] SICHUAN YONGXING ELECTRONICS CO.,LTD. *Datasheet: WIRE-WOUND RESISTORS*. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/114/300/rr-1r0-50w-5-100ppm-metal-wir-yong-datasheet-1.pdf>



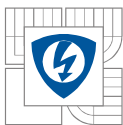
- [12] Produkty. MĚŘÍCÍ TRANSFORMÁTORY S.R.O. *Měřicí transformátory s.r.o* [online]. [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: [http://www.mtbrno.cz/index.php?l=cs&k=produkty&r=s\\_class&pproud=1000&trida=0.1](http://www.mtbrno.cz/index.php?l=cs&k=produkty&r=s_class&pproud=1000&trida=0.1)
- [13] DataTec. [online]. [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: [http://www.datatec.de/shop/pix/a/n/Chauvin\\_Arnoux-p01120509.jpg](http://www.datatec.de/shop/pix/a/n/Chauvin_Arnoux-p01120509.jpg)
- [14] RMS to DC Converter. ANALOG DEVICES. *Analog Devices* [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/special-linear-functions/rms-to-dc-converters/ad637/products/product.html>
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. *Datasheet*. 2013. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref5050.pdf>
- [16] PPM Power. PPM POWER. [online]. [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: [http://www.pmpower.co.uk/images/it\\_60\\_s\\_ultrastab.jpg](http://www.pmpower.co.uk/images/it_60_s_ultrastab.jpg)
- [17] ANALOG DEVICES. Analog Devices [online]. [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD7715.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7715.pdf)
- [18] ST MICROELECTRONICS. GM Eelectronics [online]. [cit. 2014-12-12]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/149/7805-stm-datasheet-1.pdf>
- [19] LANGSTER. Topic: problem controlling an AD7715 using SPI with an Arduino Uno. In: *Arduino forum* [online]. [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=109783.0>
- [20] TROJAN, Martin a . 2008. *Standardní nejistoty měření* [online]. Brno [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=7735](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7735). Bakalářská. VUT. Vedoucí práce Ing. Marie Havlíková.





## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

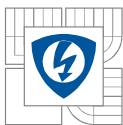
Označení	Slovní popis
$I_{2\_REF}$	Referenční proud změřený pomocí Fluke 8845A
$N$	Dekadická hodnota z AD převodníku
$I_C$	Hodnoty proudu vypočtené z hodnot naměřených demonstrátorem
$I_1$	Proud primárním vinutím
$\bar{N}$	Střední hodnota dekadické hodnoty z AD převodníku
$\overline{I_{2\_REF}}$	Střední hodnota změřeného referenčního proudu
$\overline{I_C}$	Střední hodnota proudu vypočteného z hodnot naměřených demonstrátorem
$\sigma_{I_C}^2$	Rozptyl z hodnot proudu vypočtených z naměřených hodnot
$u_{A\_I_C}$	Nejistota typu A proudu vypočteného z hodnot naměřených demonstrátorem
$u_{A\_I_C-2}$	Nejistota typu A proudu respektující nejistotu, kterou by do systému vnesl námi vybraný proudový transformátor
$u_{I_C}$	Rozšířená nejistota soustavy
$K$	Korekce
$U_{REF}$	Napěťová reference
$k$	Hodnota jednoho dílku
$k_2$	Maximální zvolený rozsah
$P$	Činný výkon
$S$	Zdánlivý výkon
$\mu_0$	Permeabilita vakua
$B$	Magnetická indukce
$I_{CELK}$	Celkový proud procházející smyčkou
$U_H$	Hallovo napětí
$R_H$	Hallova konstanta
$U_0$	Napětí na vstupu operačního zesilovače
$R_0$	Odpor mezi invertujícím a vstupem a výstupem operačního zesilovače
$d$	Tloušťka Hallový sondy
$\Phi_1$	Magnetický tok transformátoru
$\Phi_2$	Magnetický tok transformátoru
$U_{11}$	Napětí na sekundární straně transformátoru
$U_{12}$	Napětí na sekundární straně transformátoru
$I_m$	Magnetizační proud
$I_2$	Kompenzační proud z operačního zesilovače



$R$	Rezistivita bočnicku
$P_{ZTR}$	Ztrátový výkon na bočnicku
$U_{BOČNÍK}$	Napětí na bočnicku
$U_{KROK}$	Napětí reprezentující jeden dílek našeho systému
$U_{AW}$	Nejistota 0,1% převedena na absolutní hodnotu napětí
$p$	Převodní konstanta
$I_{OZ}$	Špičková hodnota proudu na výstupu operačního zesilovače
$C_{AV}$	Averaging capacitor – kapacita kondenzátoru k RMS to DC převodníku AD637
$C_2$	Filtrační kondenzátor pro AD637
$C_3$	Filtrační kondenzátor pro AD637
MCLK IN	Vstup oscilátoru
MCLK OUT	Výstup oscilátoru
LM7805	Lineární regulátor napětí s výstupem 5V
REF5020	Napěťová reference 2,048V
OPA544	Operační zesilovač
AD637	RMS to DC převodník
AD7715	16 bitový analog – digital převodník

## SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
HC49/U	2,4576 MHz	SMD, 11.5mm x 5 mm	Rezonátor
RX24 1R0 50W	1Ω	METAL	Rezistor
VISHAY CRCW06034K70JNEA	4,7kΩ	SMD 0805	Rezistor
VISHAY CRCW080524K0FKEA	24kΩ	SMD 1206	Rezistor
PANASONIC ECA-2AHG100	10μF	Radiální 6,3 mm	Kondenzátor
AVX UT026D104MAC2F	0,1μF	SMD 1206	Kondenzátor
TDK C2012X5R1A476M125AC	47μF	SMD 1206	Kondenzátor
TDK C1608X5R1C335K080AC	3,3μF	SMD 1206	Kondenzátor
TDK C3216X7R1C685K160AC	6,8μF	SMD 1206	Kondenzátor
HEADER, R/A 5.08MM 2WAY	-----	-----	Napájecí konektor
BUCHANAN 796638-2 HE	-----	-----	Napájecí konektor
AD637JQ	-----	DIL14	RMS to DC převodník
AD7715ARZ-5	-----	SOIC16	AD převodník
REF5020AIDG4	-----	SOIC8	Napěťová reference
Arduino Nano	-----	-----	Mikrokotrolér
PSH02-06PG	-----	-----	Konektor se zámkem
PFH02-06P	-----	-----	Konektor se zámkem



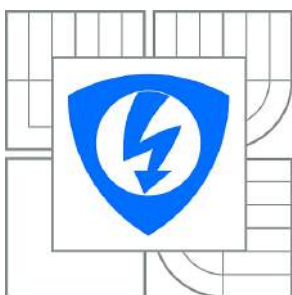
## SEZNAM PŘÍLOH

Číslo přílohy	Popis přílohy
1	Elektrické schéma demonstrátoru s kompenzovaným proudovým transformátorem
2	Elektrické schéma demonstrátoru bez kompenzovaného proudového transformátoru
3	Grafické zpracování a naměřených a vypočtených hodnot
4	Fotografie měřicího stanoviště a kompletního demonstrátoru
5	Kalibrační list referenčního měřidla



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

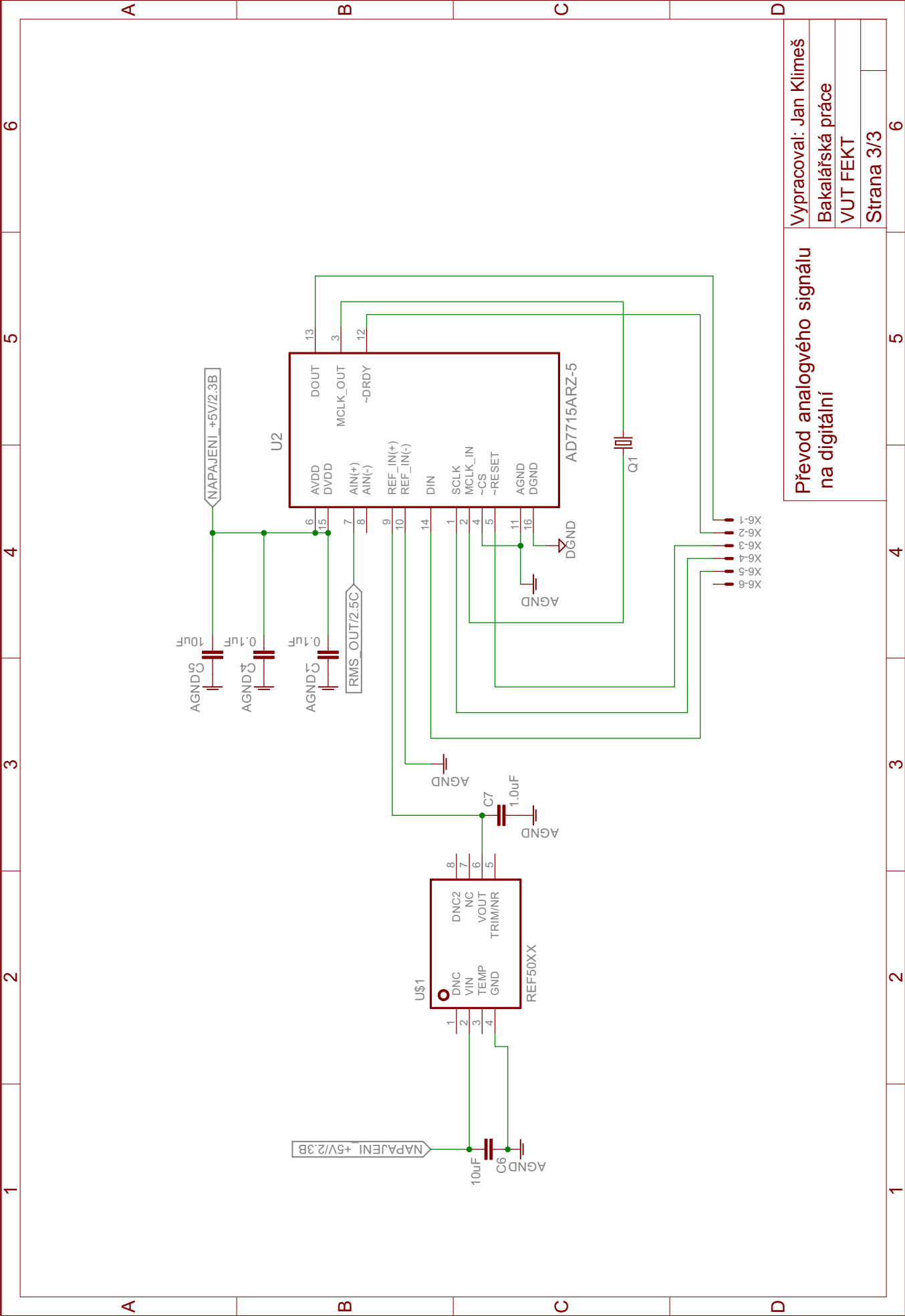
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## NÁVRH ZDROJE 1000A AC PRO KALIBRACI SENZORŮ PROUDU

DRAFT SOURCES 1000A AC CURRENT SENSORS FOR CALIBRATION

### PŘÍLOHA Č.1

ELEKTRICKÉ SCHÉMA DEMONSTRÁTORU S KOMPENZOVANÝM  
PROUDOVÝM TRANSFORMÁTOREM



Převod analogového signálu  
na digitální

Vypracoval: Jan Klimeš

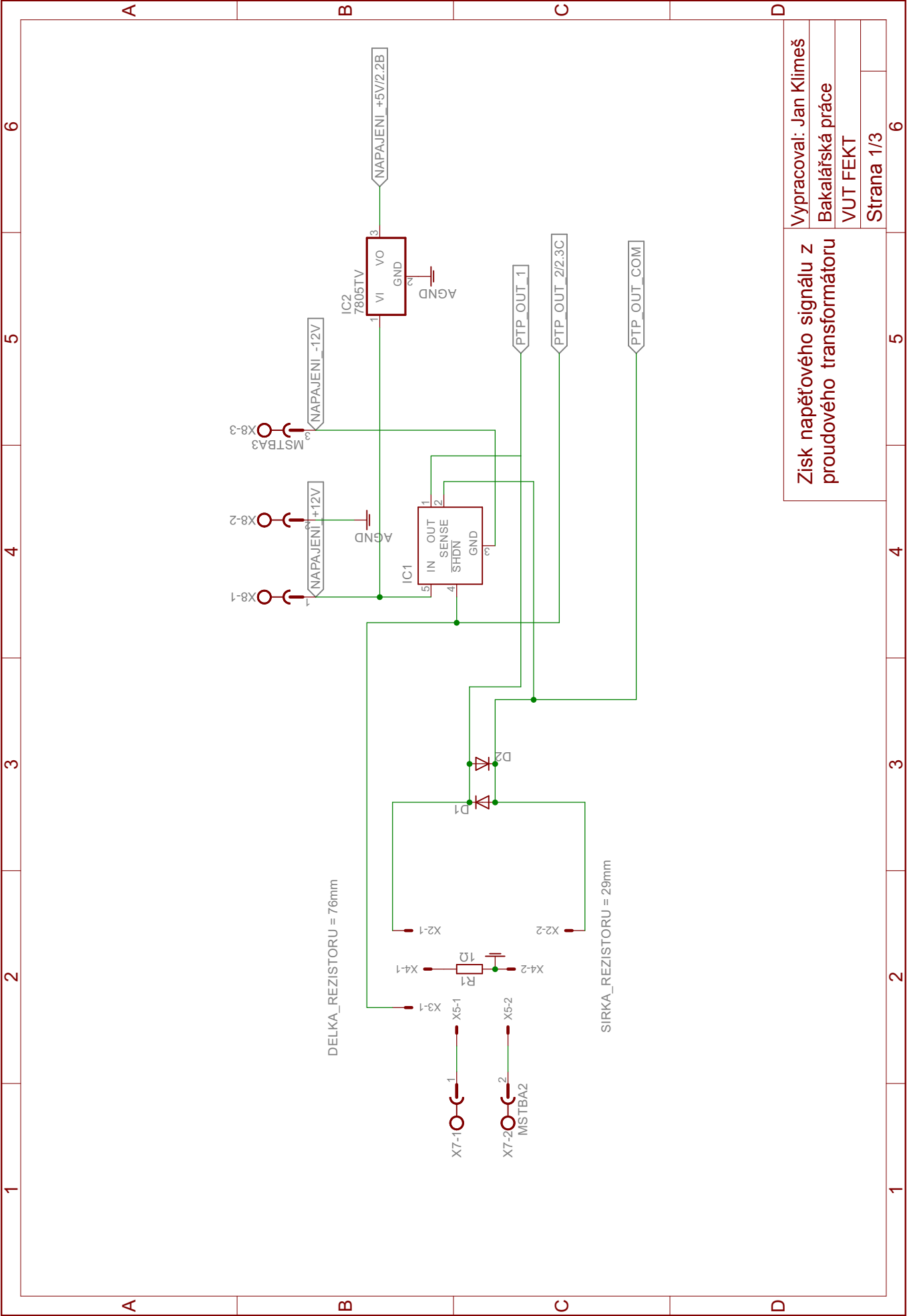
Bakalářská práce

VUT FEKT

Strana 3/3

6





Zisk napětového signálu z  
proudového transformátoru

Vypracoval: Jan Klimeš

Bakalářská práce

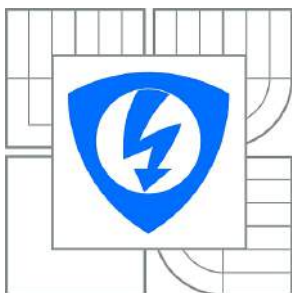
VUT FEKT

Strana 1/3



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

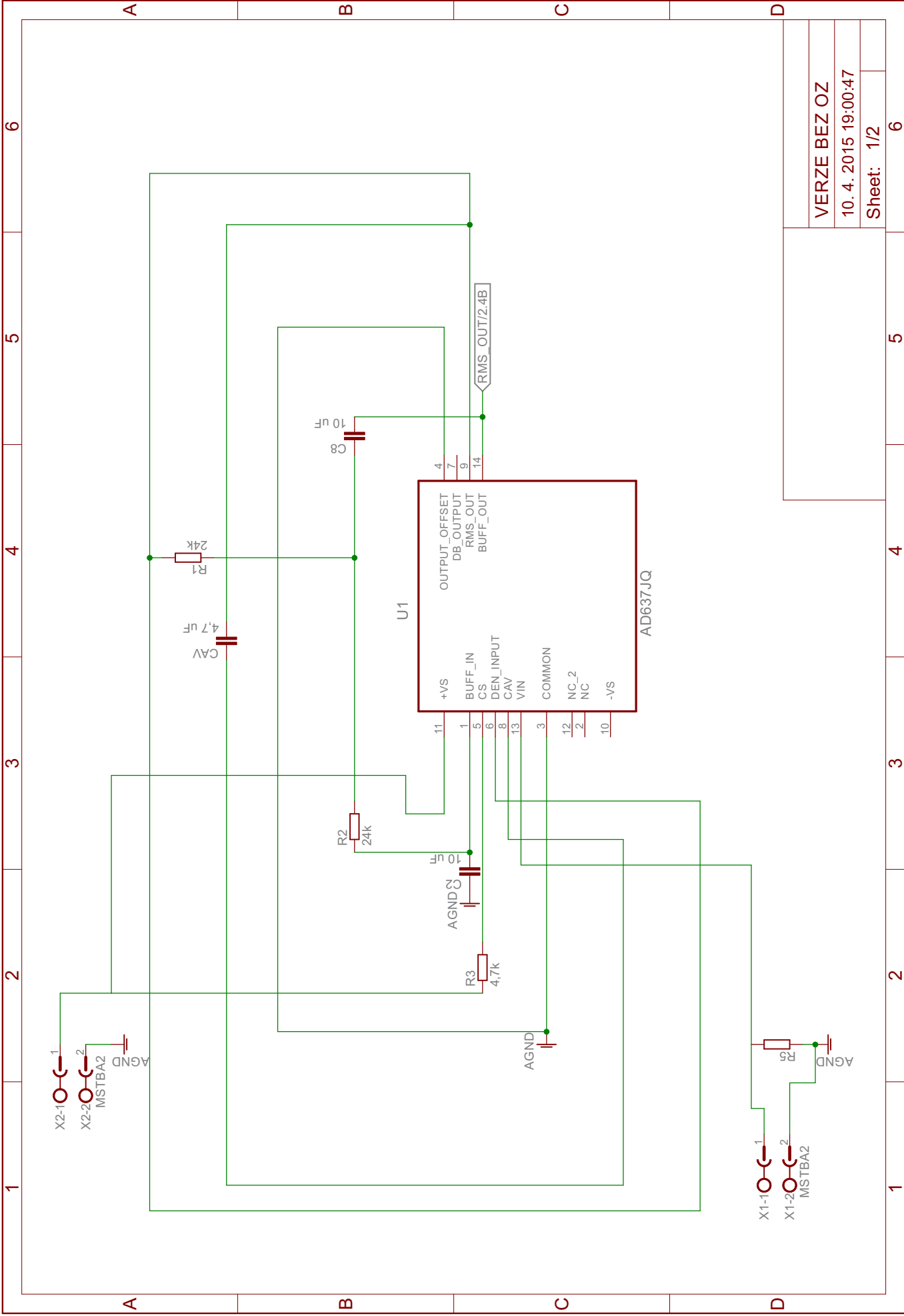
## NÁVRH ZDROJE 1000A AC PRO KALIBRACI SENZORŮ PROUDU

DRAFT SOURCES 1000A AC CURRENT SENSORS FOR CALIBRATION

### PŘÍLOHA Č.2

ELEKTRICKÉ SCHÉMA DEMONSTRÁTORU BEZ KOMPENZOVANÉHO  
PROUDOVÉHO TRANSFORMÁTORU









VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

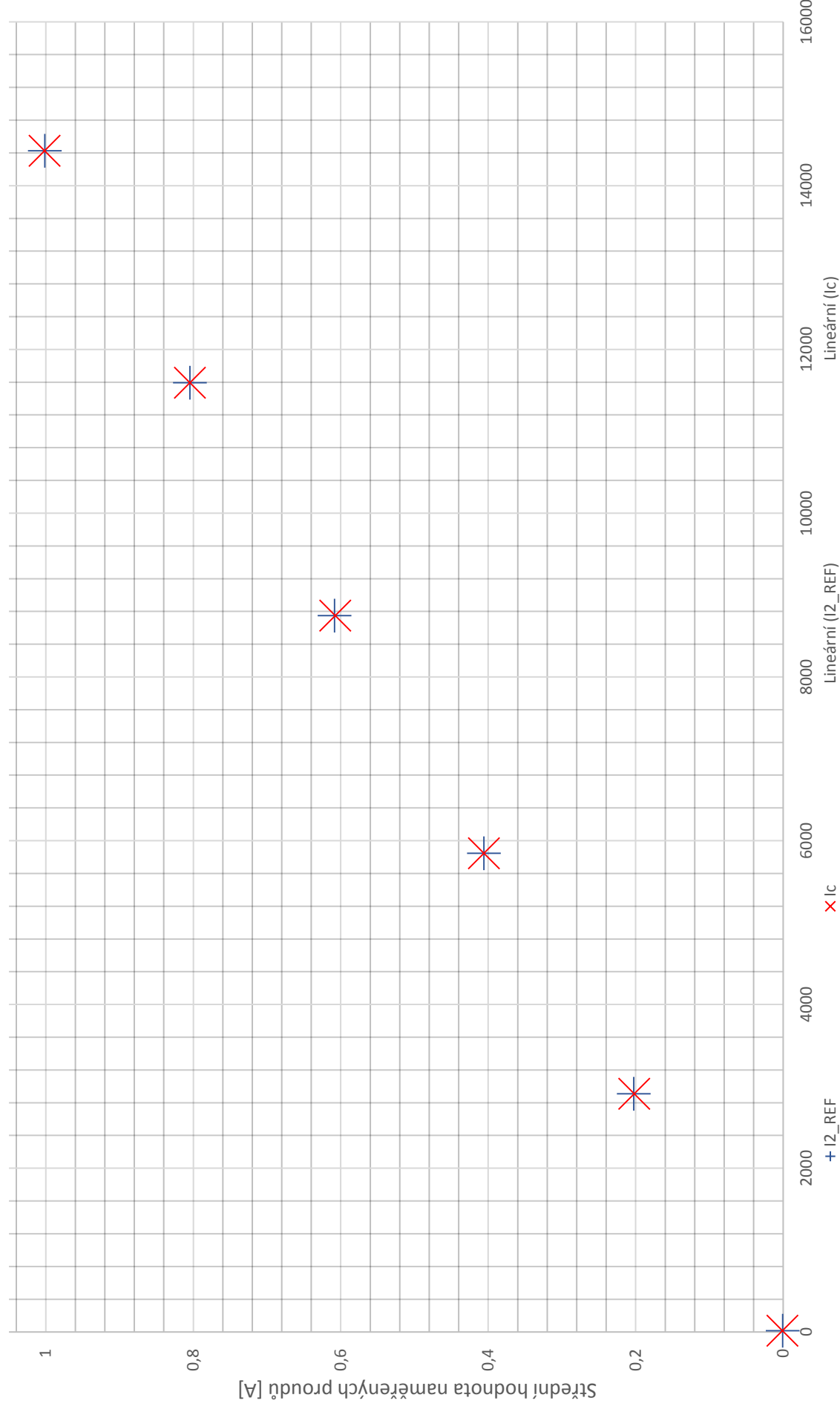
## NÁVRH ZDROJE 1000A AC PRO KALIBRACI SENZORŮ PROUDU

DRAFT SOURCES 1000A AC CURRENT SENSORS FOR CALIBRATION

### PŘÍLOHA Č.3

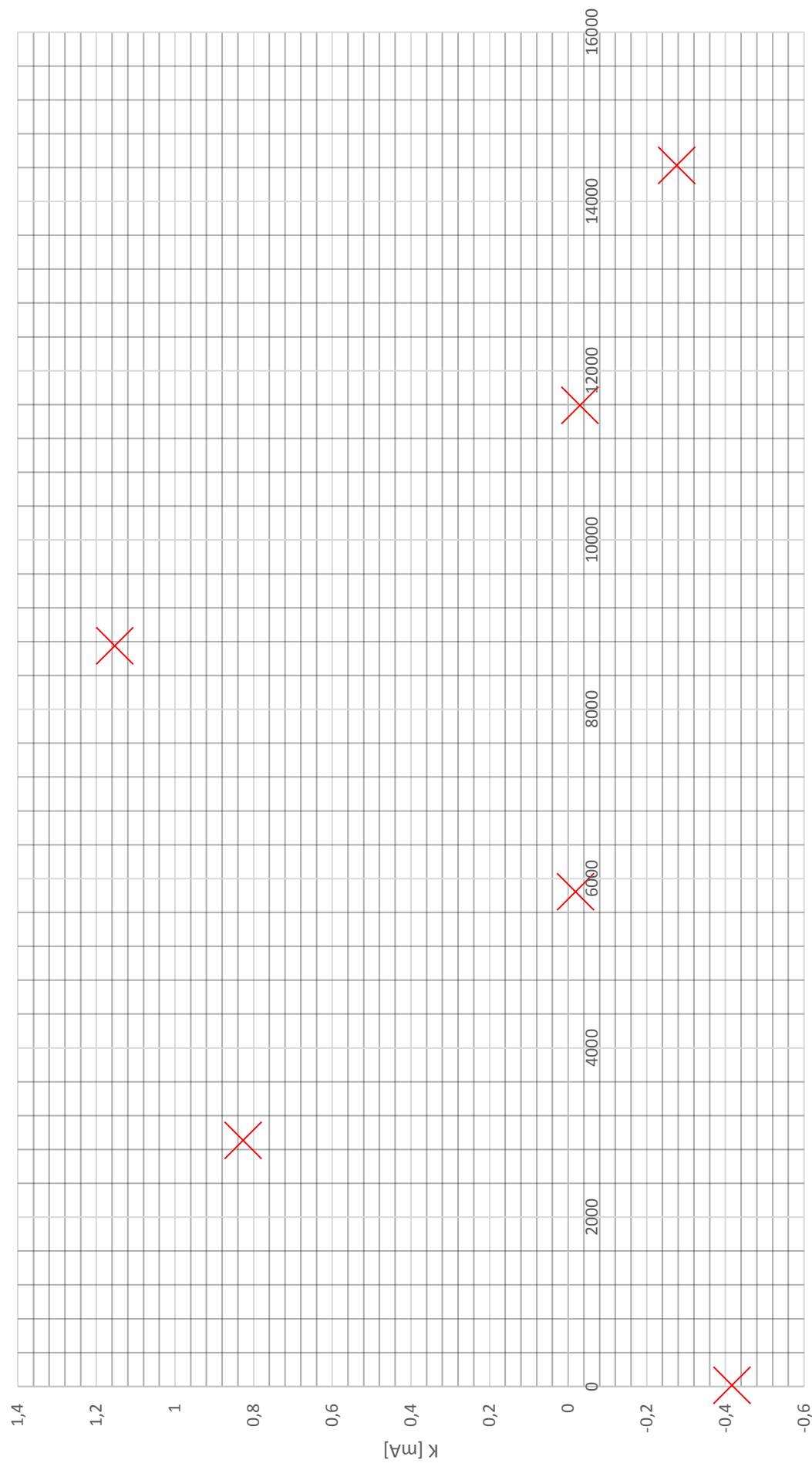
GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT

## Referenční a naměřené hodnoty proudu



Střední hodnota dílků naměřených naší soustavou [-]  $I_{2\_REF} = 6,9420886550E-05 * N + 2,5175953495E-04$   $I_c = 6,927315077E-05 * N - 1,2215482678E-06$

## Korekční křivka

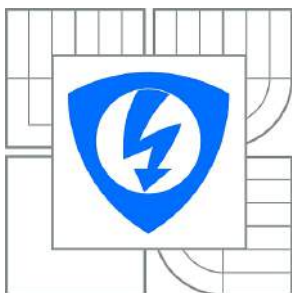


Střední hodnota dílků naměřených naší soustavou [-]



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

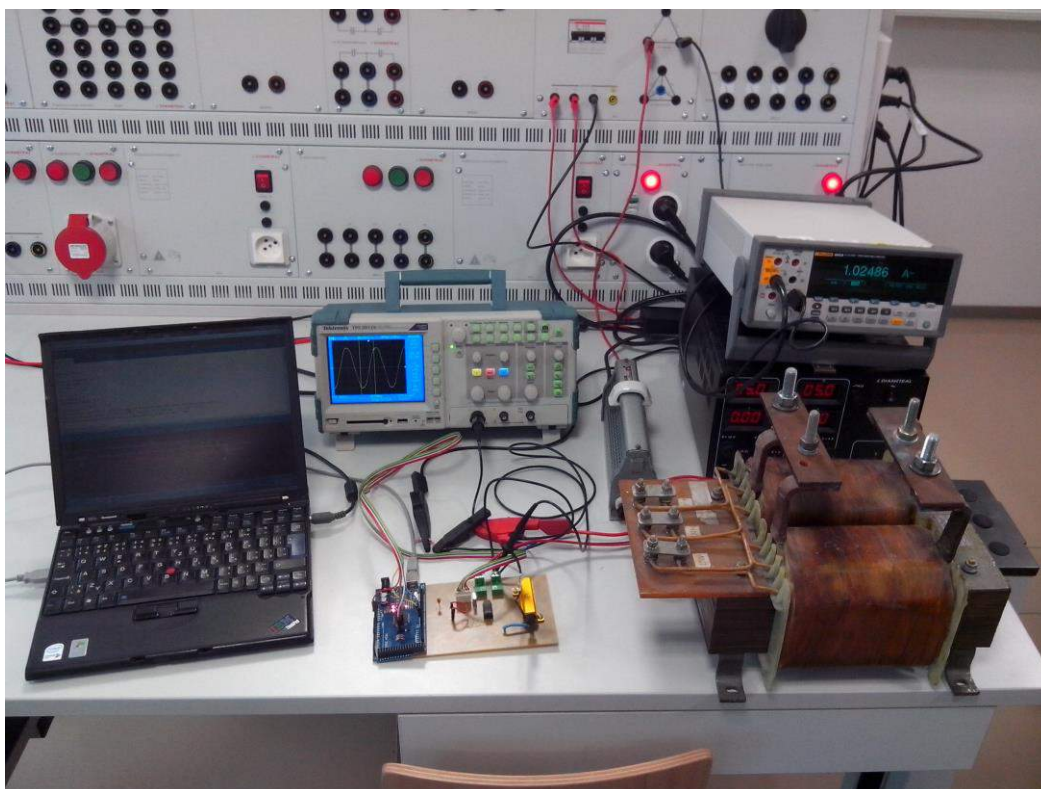
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## NÁVRH ZDROJE 1000A AC PRO KALIBRACI SENZORŮ PROUDU

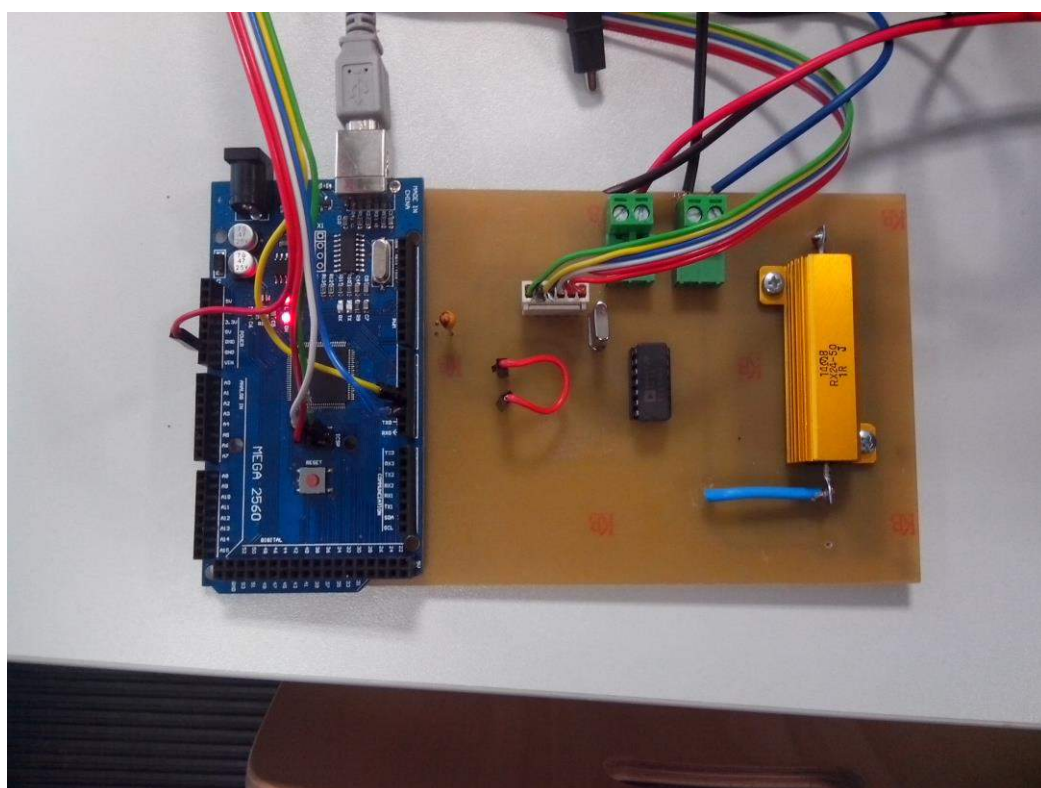
DRAFT SOURCES 1000A AC CURRENT SENSORS FOR CALIBRATION

### PŘÍLOHA Č.4

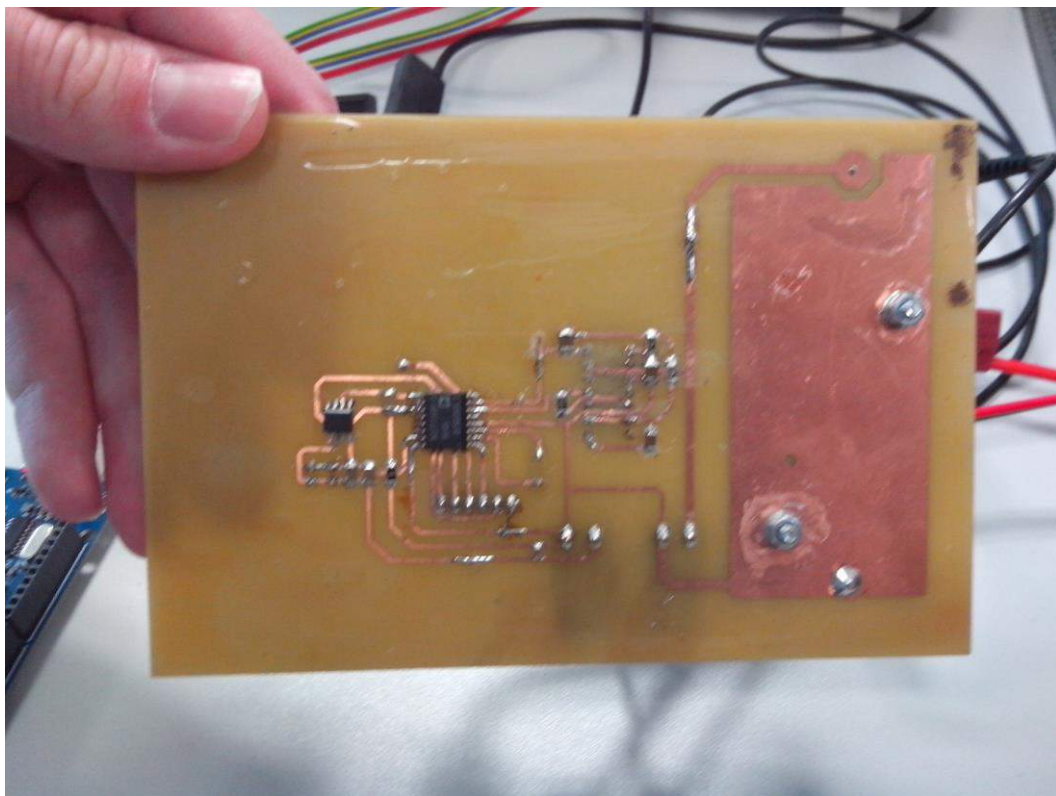
FOTOGRAFIE MĚŘICÍHO STANOVISTĚ A KOMPLETNÍHO  
DEMONSTRÁTORU



*Fotografie 1: Kompletní měřící soustava*



*Fotografie 2: Svrchní strana demonstrátoru s mikrokontrolérem*



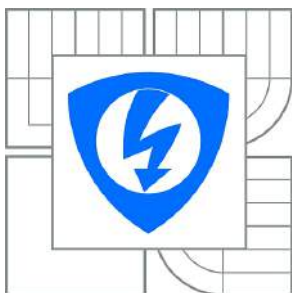
*Fotografie 3: Spodní strana demonstoraťoru*





VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## NÁVRH ZDROJE 1000A AC PRO KALIBRACI SENZORŮ PROUDU

DRAFT SOURCES 1000A AC CURRENT SENSORS FOR CALIBRATION

### PŘÍLOHA Č.5

KALIBRAČNÍ LIST REFERENČNÍHO MĚŘIDLA



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno



tel. +420 545 555 111, fax +420 545 222 728, www.cmi.cz

**Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.**

**Pracoviště:** Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno  
Oddělení primární etalonáže ss a nf elektrických veličin, tel. +420 545555208, fax +420 545555183

## KALIBRAČNÍ LIST

**6011-KL-L0244-15**

Tento kalibrační list je v souladu s kalibračními schopnostmi měření (CMC), které jsou uvedeny v příloze C Ujednání o vzájemném uznávání (MRA) vydaného Mezinárodním výborem pro míry a váhy (CIPM). Podle tohoto Ujednání všechny zúčastněné instituty vzájemně uznávají platnost svých kalibračních listů pro veličiny, rozsahy a nejistoty měření uvedené v příloze C (podrobnosti viz [www.bipm.org](http://www.bipm.org)).

**Datum vystavení:** 18.03.2015

List 1 z(e) 9 listů

**Zákazník:** Vysoké učení technické v Brně  
Kolejní 7 / VTPPL  
617 00 Brno  
Česká Republika

**Měřidlo:** Číslicový multimetr  
**Výrobce:** Fluke  
**Typ:** 8845A  
**Výrobní číslo:** 9564012

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

**Použité etalony:** Multifunkční kalibrátor Fluke 5720A, v.č. 9385202, kalibrační list č. 6011-KL-E0057-14.  
Funkční generátor HP 33120A, v.č. US36020138, kalibrační list č. 6011-KL-E0003-15.

Všechny použité etalony mají metrologickou návaznost na (mezi)národní etalony.

**Datum kalibrace:** 09.03.2015

**Kalibraci provedl:**

**Ředitel Oblastního inspektorátu  
Brno:**

Ing. Jiří STREIT



Ing. Radovan WIECEK

*Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.*

**Kalibrační postup:** Kalibrované měřidlo bylo porovnáno se sekundárním etalonem Fluke 5720A.  
Funkce "FREQ" byla kalibrována přímým porovnáním s funkčním generátorem HP 33120A.  
Kalibrace byla provedena podle kalibračního postupu č. 611-MP-C098 a 113-MP-C007.

**Podmínky prostředí:** teplota v laboratoři:  $(23.0 \pm 0.7) ^\circ\text{C}$   
relativní vlhkost vzduchu:  $(41.0 \pm 10.0) \%$

**Výsledky kalibrace:** Výsledky měření viz tabulky hodnot.  
V tabulkách hodnot jsou uváděny jednorroční specifikace výrobce. Měřidlo nebylo dojustováno. Hodnoty označené "!!!" jsou mimo specifikace uváděné výrobcem. V hodnotách čerpání specifikace není zahrnuta nejistota měření.

**Nejistota měření:** Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02.  
Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu  $k$ , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření  $k = 2$ .

Nejistota měření uváděná v tabulkách hodnot platí po zaokrouhlení nahoru na dvě platné číslice.



## Tabulky hodnot:

## Stejnoseměrná napětí

Rozsah	Hodnota nastavená	Hodnota zjištěná	Absolutní chyba	Specifikace výrobce	Čerpání specifik.	Nejistota měření
100 mV	0.000 00 mV	0.000 0 mV	0.0 $\mu$ V	$\pm 3.5 \mu$ V	0 %	0.6 $\mu$ V
	100.000 00 mV	99.999 9 mV	-0.1 $\mu$ V	$\pm 8.5 \mu$ V	-1 %	1.3 $\mu$ V
	-100.000 00 mV	-100.000 2 mV	-0.2 $\mu$ V	$\pm 8.5 \mu$ V	-2 %	1.3 $\mu$ V
1 V	0.000 000 0 V	0.000 000 V	0 $\mu$ V	$\pm 7 \mu$ V	0 %	1 $\mu$ V
	1.000 000 0 V	1.000 000 V	0 $\mu$ V	$\pm 47 \mu$ V	0 %	6 $\mu$ V
	-1.000 000 0 V	-1.000 001 V	-1 $\mu$ V	$\pm 47 \mu$ V	-2 %	6 $\mu$ V
10 V	0.000 000 V	0.000 00 V	0.00 mV	$\pm 0.05$ mV	0 %	0.01 mV
	1.500 000 V	1.500 00 V	0.00 mV	$\pm 0.10$ mV	0 %	0.01 mV
	-1.500 000 V	-1.500 00 V	0.00 mV	$\pm 0.10$ mV	0 %	0.01 mV
	3.000 000 V	3.000 00 V	0.00 mV	$\pm 0.16$ mV	0 %	0.02 mV
	-3.000 000 V	-3.000 01 V	-0.01 mV	$\pm 0.16$ mV	-6 %	0.02 mV
	5.000 000 V	5.000 01 V	0.01 mV	$\pm 0.23$ mV	4 %	0.02 mV
	-5.000 000 V	-5.000 01 V	-0.01 mV	$\pm 0.23$ mV	-4 %	0.02 mV
	8.000 000 V	8.000 02 V	0.02 mV	$\pm 0.33$ mV	6 %	0.03 mV
	-8.000 000 V	-8.000 02 V	-0.02 mV	$\pm 0.33$ mV	-6 %	0.03 mV
	10.000 000 V	10.000 02 V	0.02 mV	$\pm 0.40$ mV	5 %	0.04 mV
	-10.000 000 V	-10.000 03 V	-0.03 mV	$\pm 0.40$ mV	-7 %	0.04 mV
	11.900 000 V	11.900 04 V	0.04 mV	$\pm 0.47$ mV	9 %	0.05 mV
	-11.900 000 V	-11.900 04 V	-0.04 mV	$\pm 0.47$ mV	-9 %	0.05 mV
100 V	0.000 00 V	0.000 0 V	0.0 mV	$\pm 0.6$ mV	0 %	0.1 mV
	100.000 00 V	99.999 7 V	-0.3 mV	$\pm 5.1$ mV	-6 %	0.6 mV
	-100.000 00 V	-100.000 1 V	-0.1 mV	$\pm 5.1$ mV	-2 %	0.6 mV
1000 V	0.000 0 V	0.000 V	0 mV	$\pm 10$ mV	0 %	1 mV
	1000.000 0 V	1000.004 V	4 mV	$\pm 55$ mV	7 %	7 mV
	-1000.000 0 V	-1000.005 V	-5 mV	$\pm 55$ mV	-9 %	7 mV

## Střídavá napětí

Rozsah	Hodnota nastavená	Hodnota zjištěná	Absolutní chyba	Specifikace výrobce	Čerpání specif.	Nejistota měření
100 mV	10.000 0 mV; 10 Hz	9.994 3 mV	-5.7 $\mu$ V	$\pm 46.0 \mu$ V	-12 %	6.4 $\mu$ V
	10.000 0 mV; 45 Hz	9.993 3 mV	-6.7 $\mu$ V	$\pm 46.0 \mu$ V	-15 %	5.0 $\mu$ V
	10.000 0 mV; 400 Hz	9.997 2 mV	-2.8 $\mu$ V	$\pm 46.0 \mu$ V	-6 %	4.8 $\mu$ V
	10.000 0 mV; 1 kHz	9.997 4 mV	-2.6 $\mu$ V	$\pm 46.0 \mu$ V	-6 %	4.8 $\mu$ V
	10.000 0 mV; 20 kHz	9.993 9 mV	-6.1 $\mu$ V	$\pm 46.0 \mu$ V	-13 %	4.8 $\mu$ V
	10.000 0 mV; 50 kHz	9.998 0 mV	-2.0 $\mu$ V	$\pm 62.0 \mu$ V	-3 %	6.0 $\mu$ V
	10.000 0 mV; 100 kHz	10.001 5 mV	1.5 $\mu$ V	$\pm 140.0 \mu$ V	1 %	10.0 $\mu$ V
	10.000 0 mV; 300 kHz	9.742 8 mV	-257.2 $\mu$ V	$\pm 900.0 \mu$ V	-29 %	20.5 $\mu$ V
	100.000 0 mV; 10 Hz	100.004 1 mV	4.1 $\mu$ V	$\pm 100.0 \mu$ V	4 %	36.1 $\mu$ V
	100.000 0 mV; 45 Hz	99.994 6 mV	-5.4 $\mu$ V	$\pm 100.0 \mu$ V	-5 %	15.3 $\mu$ V
	100.000 0 mV; 400 Hz	100.003 9 mV	3.9 $\mu$ V	$\pm 100.0 \mu$ V	4 %	15.0 $\mu$ V
	100.000 0 mV; 1 kHz	100.004 0 mV	4.0 $\mu$ V	$\pm 100.0 \mu$ V	4 %	15.0 $\mu$ V
	100.000 0 mV; 20 kHz	99.989 2 mV	-10.8 $\mu$ V	$\pm 100.0 \mu$ V	-11 %	15.0 $\mu$ V
	100.000 0 mV; 50 kHz	99.995 4 mV	-4.6 $\mu$ V	$\pm 170.0 \mu$ V	-3 %	27.0 $\mu$ V
	100.000 0 mV; 100 kHz	100.085 2 mV	85.2 $\mu$ V	$\pm 680.0 \mu$ V	13 %	63.0 $\mu$ V
	100.000 0 mV; 300 kHz	98.629 1 mV	-1370.9 $\mu$ V	$\pm 4500.0 \mu$ V	-30 %	110.0 $\mu$ V
1 V	1.000 000 V; 10 Hz	1.000 010 V	10 $\mu$ V	$\pm 900 \mu$ V	1 %	282 $\mu$ V
	1.000 000 V; 45 Hz	0.999 917 V	-83 $\mu$ V	$\pm 900 \mu$ V	-9 %	60 $\mu$ V
	1.000 000 V; 400 Hz	1.000 006 V	6 $\mu$ V	$\pm 900 \mu$ V	0 %	53 $\mu$ V
	1.000 000 V; 1 kHz	1.000 001 V	1 $\mu$ V	$\pm 900 \mu$ V	0 %	53 $\mu$ V
	1.000 000 V; 20 kHz	0.999 923 V	-77 $\mu$ V	$\pm 900 \mu$ V	-9 %	53 $\mu$ V
	1.000 000 V; 50 kHz	1.000 012 V	12 $\mu$ V	$\pm 1700 \mu$ V	0 %	85 $\mu$ V
	1.000 000 V; 100 kHz	1.001 506 V	1506 $\mu$ V	$\pm 6800 \mu$ V	22 %	140 $\mu$ V
	1.000 000 V; 300 kHz	1.009 570 V	9570 $\mu$ V	$\pm 45000 \mu$ V	21 %	500 $\mu$ V
10 V	10.000 00 V; 10 Hz	9.997 76 V	-2.24 mV	$\pm 9.00$ mV	-25 %	2.82 mV
	10.000 00 V; 45 Hz	9.996 88 V	-3.12 mV	$\pm 9.00$ mV	-35 %	0.58 mV
	10.000 00 V; 400 Hz	9.997 79 V	-2.21 mV	$\pm 9.00$ mV	-25 %	0.50 mV
	1.500 00 V; 1 kHz	1.499 48 V	-0.52 mV	$\pm 3.90$ mV	-13 %	0.13 mV
	3.000 00 V; 1 kHz	2.999 23 V	-0.77 mV	$\pm 4.80$ mV	-16 %	0.18 mV
	5.000 00 V; 1 kHz	4.998 86 V	-1.14 mV	$\pm 6.00$ mV	-19 %	0.27 mV
	7.000 00 V; 1 kHz	6.998 44 V	-1.56 mV	$\pm 7.20$ mV	-22 %	0.37 mV
	10.000 00 V; 1 kHz	9.997 77 V	-2.23 mV	$\pm 9.00$ mV	-25 %	0.50 mV
	11.900 00 V; 1 kHz	11.897 42 V	-2.58 mV	$\pm 10.14$ mV	-25 %	0.59 mV
	10.000 00 V; 20 kHz	9.998 01 V	-1.99 mV	$\pm 9.00$ mV	-22 %	0.50 mV
	10.000 00 V; 50 kHz	9.997 86 V	-2.14 mV	$\pm 17.00$ mV	-13 %	0.85 mV
	10.000 00 V; 100 kHz	9.999 98 V	-0.02 mV	$\pm 68.00$ mV	-0 %	1.20 mV
	10.000 00 V; 300 kHz	10.042 95 V	42.95 mV	$\pm 450.00$ mV	10 %	3.35 mV
100 V	100.000 0 V; 10 Hz	99.974 8 V	-25.2 mV	$\pm 90.0$ mV	-28 %	28.1 mV
	100.000 0 V; 45 Hz	99.965 2 V	-34.8 mV	$\pm 90.0$ mV	-39 %	6.1 mV
	100.000 0 V; 400 Hz	99.976 0 V	-24.0 mV	$\pm 90.0$ mV	-27 %	5.8 mV
	100.000 0 V; 1 kHz	99.976 7 V	-23.3 mV	$\pm 90.0$ mV	-26 %	5.8 mV
	100.000 0 V; 20 kHz	99.982 0 V	-18.0 mV	$\pm 90.0$ mV	-20 %	5.8 mV
	100.000 0 V; 50 kHz	99.978 8 V	-21.2 mV	$\pm 170.0$ mV	-12 %	9.0 mV
	100.000 0 V; 100 kHz	99.994 8 V	-5.2 mV	$\pm 680.0$ mV	-0 %	17.5 mV
750 V	750.000 V; 45 Hz	749.802 V	-198 mV	$\pm 675$ mV	-29 %	76 mV
	750.000 V; 400 Hz	749.879 V	-121 mV	$\pm 675$ mV	-18 %	56 mV
	750.000 V; 1 kHz	749.888 V	-112 mV	$\pm 675$ mV	-17 %	56 mV

Český metrologický institut  
Oblastní inspektorát Brno



*Střídavá napětí*

Rozsah	Hodnota nastavená	Hodnota zjištěná	Absolutní chyba	Specifikace výrobce	Čerpání specif.	Nejistota měření
750 V	750.000 V; 20 kHz	749.884 V	-116 mV	± 675 mV	-17 %	130 mV
	750.000 V; 50 kHz	749.739 V	-261 mV	± 1275 mV	-20 %	461 mV
	750.000 V; 100 kHz	748.107 V	-1893 mV	± 5100 mV	-37 %	1775 mV

Český metrologický institut  
Oblastní inspektorát Brno  
Okružní 31  
538 00 Brno  
-9-

*Stejnoseměrné proudy*

Rozsah	Hodnota nastavená	Hodnota zjištěná	Absolutní chyba	Specifikace výrobce	Čerpání specifik.	Nejistota měření
100 $\mu$ A	0.000 0 $\mu$ A	0.002 5 $\mu$ A	2.5 nA	$\pm 25.0$ nA	10 %	7.7 nA
	100.000 0 $\mu$ A	100.004 8 $\mu$ A	4.8 nA	$\pm 75.0$ nA	6 %	11.0 nA
	-100.000 0 $\mu$ A	-100.001 0 $\mu$ A	-1.0 nA	$\pm 75.0$ nA	-1 %	11.0 nA
1 mA	0.000 000 mA	0.000 004 mA	4 nA	$\pm 50$ nA	8 %	8 nA
	1.000 000 mA	1.000 043 mA	43 nA	$\pm 550$ nA	8 %	42 nA
	-1.000 000 mA	-1.000 050 mA	-50 nA	$\pm 550$ nA	-9 %	42 nA
10 mA	0.000 00 mA	-0.000 06 mA	-0.06 $\mu$ A	$\pm 2.00$ $\mu$ A	-3 %	0.43 $\mu$ A
	10.000 00 mA	9.999 64 mA	-0.36 $\mu$ A	$\pm 7.00$ $\mu$ A	-5 %	0.70 $\mu$ A
	-10.000 00 mA	-10.000 22 mA	-0.22 $\mu$ A	$\pm 7.00$ $\mu$ A	-3 %	0.55 $\mu$ A
100 mA	0.000 0 mA	0.000 3 mA	0.3 $\mu$ A	$\pm 5.0$ $\mu$ A	6 %	0.9 $\mu$ A
	15.000 0 mA	15.000 4 mA	0.4 $\mu$ A	$\pm 12.5$ $\mu$ A	3 %	1.6 $\mu$ A
	-15.000 0 mA	-14.999 7 mA	0.3 $\mu$ A	$\pm 12.5$ $\mu$ A	2 %	1.5 $\mu$ A
	30.000 0 mA	30.000 3 mA	0.3 $\mu$ A	$\pm 20.0$ $\mu$ A	1 %	2.2 $\mu$ A
	-30.000 0 mA	-30.000 1 mA	-0.1 $\mu$ A	$\pm 20.0$ $\mu$ A	-0 %	2.2 $\mu$ A
	50.000 0 mA	50.000 5 mA	0.5 $\mu$ A	$\pm 30.0$ $\mu$ A	2 %	3.0 $\mu$ A
	-50.000 0 mA	-50.000 2 mA	-0.2 $\mu$ A	$\pm 30.0$ $\mu$ A	-0 %	3.0 $\mu$ A
	80.000 0 mA	80.000 1 mA	0.1 $\mu$ A	$\pm 45.0$ $\mu$ A	0 %	4.3 $\mu$ A
	-80.000 0 mA	-80.000 5 mA	-0.5 $\mu$ A	$\pm 45.0$ $\mu$ A	-1 %	4.3 $\mu$ A
	100.000 0 mA	99.999 7 mA	-0.3 $\mu$ A	$\pm 55.0$ $\mu$ A	-0 %	5.2 $\mu$ A
	-100.000 0 mA	-100.000 4 mA	-0.4 $\mu$ A	$\pm 55.0$ $\mu$ A	-0 %	5.2 $\mu$ A
	119.000 0 mA	118.998 9 mA	-1.1 $\mu$ A	$\pm 65.0$ $\mu$ A	-2 %	7.4 $\mu$ A
	-119.000 0 mA	-119.000 1 mA	-0.1 $\mu$ A	$\pm 65.0$ $\mu$ A	-0 %	7.4 $\mu$ A
400 mA	0.000 mA	0.001 mA	1 $\mu$ A	$\pm 20$ $\mu$ A	5 %	12 $\mu$ A
	400.000 mA	399.994 mA	-6 $\mu$ A	$\pm 220$ $\mu$ A	-3 %	44 $\mu$ A
	-400.000 mA	-399.985 mA	15 $\mu$ A	$\pm 220$ $\mu$ A	7 %	44 $\mu$ A
1 A	0.000 000 A	0.000 020 A	20 $\mu$ A	$\pm 200$ $\mu$ A	10 %	60 $\mu$ A
	1.000 000 A	1.000 067 A	67 $\mu$ A	$\pm 700$ $\mu$ A	10 %	113 $\mu$ A
	-1.000 000 A	-0.999 995 A	5 $\mu$ A	$\pm 700$ $\mu$ A	0 %	105 $\mu$ A
3 A	0.000 00 A	0.000 00 A	0.00 mA	$\pm 0.60$ mA	0 %	0.48 mA
	3.000 00 A	3.000 23 A	0.23 mA	$\pm 3.60$ mA	6 %	1.56 mA
	-3.000 00 A	-3.000 21 A	-0.21 mA	$\pm 3.60$ mA	-6 %	1.56 mA
10 A	0.000 00 A	0.000 02 A	0.02 mA	$\pm 0.80$ mA	3 %	0.48 mA
	10.000 00 A	10.001 05 A	1.05 mA	$\pm 15.80$ mA	7 %	4.08 mA
	-10.000 00 A	-10.001 24 A	-1.24 mA	$\pm 15.80$ mA	-8 %	4.08 mA



## Střídavé proudy

Rozsah	Hodnota nastavená	Hodnota zjištěná	Absolutní chyba	Specifikace výrobce	Čerpání specif.	Nejistota měření
10 mA	10.000 0 mA; 10 Hz	10.000 95 mA	0.95 $\mu$ A	$\pm 21.00 \mu$ A	5 %	2.91 $\mu$ A
	10.000 0 mA; 50 Hz	10.000 17 mA	0.17 $\mu$ A	$\pm 21.00 \mu$ A	0 %	1.60 $\mu$ A
	10.000 0 mA; 400 Hz	10.000 95 mA	0.95 $\mu$ A	$\pm 21.00 \mu$ A	5 %	1.60 $\mu$ A
	10.000 0 mA; 1 kHz	10.000 66 mA	0.66 $\mu$ A	$\pm 21.00 \mu$ A	3 %	1.60 $\mu$ A
	10.000 0 mA; 5 kHz	9.995 09 mA	-4.91 $\mu$ A	$\pm 21.00 \mu$ A	-23 %	2.60 $\mu$ A
	10.000 0 mA; 10 kHz	9.987 64 mA	-12.36 $\mu$ A	$\pm 105.00 \mu$ A	-12 %	16.00 $\mu$ A
100 mA	100.000 mA; 10 Hz	100.007 4 mA	7.4 $\mu$ A	$\pm 140.0 \mu$ A	5 %	29.0 $\mu$ A
	100.000 mA; 50 Hz	100.000 1 mA	0.1 $\mu$ A	$\pm 140.0 \mu$ A	0 %	15.0 $\mu$ A
	15.000 mA; 400 Hz	14.999 3 mA	-0.7 $\mu$ A	$\pm 55.0 \mu$ A	-1 %	2.0 $\mu$ A
	30.000 mA; 400 Hz	30.001 5 mA	1.5 $\mu$ A	$\pm 70.0 \mu$ A	2 %	6.0 $\mu$ A
	70.000 mA; 400 Hz	70.005 4 mA	5.4 $\mu$ A	$\pm 110.0 \mu$ A	5 %	11.0 $\mu$ A
	100.000 mA; 400 Hz	100.008 4 mA	8.4 $\mu$ A	$\pm 140.0 \mu$ A	6 %	15.0 $\mu$ A
	119.000 mA; 400 Hz	119.010 7 mA	10.7 $\mu$ A	$\pm 159.0 \mu$ A	7 %	17.0 $\mu$ A
	100.000 mA; 1 kHz	100.005 3 mA	5.3 $\mu$ A	$\pm 140.0 \mu$ A	4 %	15.0 $\mu$ A
	100.000 mA; 5 kHz	99.960 4 mA	-39.6 $\mu$ A	$\pm 140.0 \mu$ A	-28 %	24.0 $\mu$ A
	100.000 mA; 10 kHz	99.912 7 mA	-87.3 $\mu$ A	$\pm 450.0 \mu$ A	-19 %	120.0 $\mu$ A
400 mA	400.00 mA; 10 Hz	399.686 mA	-314 $\mu$ A	$\pm 800 \mu$ A	-39 %	140 $\mu$ A
	400.00 mA; 50 Hz	399.837 mA	-163 $\mu$ A	$\pm 800 \mu$ A	-20 %	141 $\mu$ A
	400.00 mA; 400 Hz	399.854 mA	-146 $\mu$ A	$\pm 800 \mu$ A	-18 %	140 $\mu$ A
	400.00 mA; 1 kHz	399.868 mA	-132 $\mu$ A	$\pm 800 \mu$ A	-16 %	140 $\mu$ A
	400.00 mA; 5 kHz	400.296 mA	296 $\mu$ A	$\pm 3600 \mu$ A	8 %	260 $\mu$ A
	400.00 mA; 10 kHz	402.305 mA	2305 $\mu$ A	$\pm 3600 \mu$ A	64 %	2960 $\mu$ A
1 A	1.000 00 A; 45 Hz	0.999 995 A	-5 $\mu$ A	$\pm 1400 \mu$ A	-0 %	290 $\mu$ A
	1.000 00 A; 400 Hz	1.000 075 A	75 $\mu$ A	$\pm 1400 \mu$ A	5 %	290 $\mu$ A
	1.000 00 A; 1 kHz	1.000 059 A	59 $\mu$ A	$\pm 1400 \mu$ A	4 %	290 $\mu$ A
	1.000 00 A; 5 kHz	0.999 507 A	-493 $\mu$ A	$\pm 1400 \mu$ A	-35 %	530 $\mu$ A
	1.000 00 A; 10 kHz	0.999 400 A	-600 $\mu$ A	$\pm 4200 \mu$ A	-14 %	7160 $\mu$ A
3 A	3.000 0 A; 45 Hz	2.999 68 A	-0.32 mA	$\pm 6.30$ mA	-5 %	1.60 mA
	3.000 0 A; 400 Hz	2.999 93 A	-0.07 mA	$\pm 6.30$ mA	-1 %	1.60 mA
	3.000 0 A; 1 kHz	3.000 04 A	0.04 mA	$\pm 6.30$ mA	0 %	0.80 mA
	3.000 0 A; 5 kHz	2.999 09 A	-0.91 mA	$\pm 6.30$ mA	-14 %	3.20 mA
	3.000 0 A; 10 kHz	2.998 81 A	-1.19 mA	$\pm 31.50$ mA	-4 %	11.60 mA
10 A	10.000 0 A; 45 Hz	9.999 50 A	-0.50 mA	$\pm 21.00$ mA	-2 %	4.80 mA
	10.000 0 A; 400 Hz	10.000 74 A	0.74 mA	$\pm 21.00$ mA	4 %	4.80 mA
	10.000 0 A; 1 kHz	10.001 11 A	1.11 mA	$\pm 21.00$ mA	5 %	2.60 mA
	10.000 0 A; 5 kHz	9.998 13 A	-1.87 mA	$\pm 21.00$ mA	-9 %	9.91 mA
	10.000 0 A; 10 kHz	9.997 29 A	-2.71 mA	$\pm 105.00$ mA	-3 %	36.80 mA



## Odpory

Rozsah	Hodnota nastavená	Hodnota zjištěná	Absolutní chyba	Specifikace výrobce	Čerpání specifik.	Nejistota měření
100 $\Omega$ 4w	0.000 00 $\Omega$	0.000 0 $\Omega$	0.0 m $\Omega$	$\pm 4.0$ m $\Omega$	0 %	0.5 m $\Omega$
	9.999 62 $\Omega$	9.999 7 $\Omega$	0.1 m $\Omega$	$\pm 5.0$ m $\Omega$	2 %	0.6 m $\Omega$
	18.998 94 $\Omega$	18.998 5 $\Omega$	-0.4 m $\Omega$	$\pm 5.9$ m $\Omega$	-7 %	0.7 m $\Omega$
	99.998 47 $\Omega$	99.996 1 $\Omega$	-2.4 m $\Omega$	$\pm 14.0$ m $\Omega$	-17 %	1.1 m $\Omega$
1 k $\Omega$ 4w	0.000 000 0 k $\Omega$	0.000 000 k $\Omega$	0 m $\Omega$	$\pm 10$ m $\Omega$	0 %	1 m $\Omega$
	0.189 994 0 k $\Omega$	0.189 992 k $\Omega$	-2 m $\Omega$	$\pm 29$ m $\Omega$	-7 %	3 m $\Omega$
	1.000 009 5 k $\Omega$	0.999 996 k $\Omega$	-14 m $\Omega$	$\pm 110$ m $\Omega$	-13 %	9 m $\Omega$
10 k $\Omega$ 4w	0.000 000 k $\Omega$	-0.000 01 k $\Omega$	-0.01 $\Omega$	$\pm 0.10$ $\Omega$	-10 %	0.01 $\Omega$
	1.900 021 k $\Omega$	1.899 99 k $\Omega$	-0.03 $\Omega$	$\pm 0.29$ $\Omega$	-10 %	0.02 $\Omega$
	9.999 844 k $\Omega$	9.999 68 k $\Omega$	-0.16 $\Omega$	$\pm 1.10$ $\Omega$	-15 %	0.09 $\Omega$
100 k $\Omega$ 4w	0.000 00 k $\Omega$	0.000 0 k $\Omega$	0.0 $\Omega$	$\pm 1.0$ $\Omega$	0 %	0.1 $\Omega$
	19.000 43 k $\Omega$	19.000 2 k $\Omega$	-0.2 $\Omega$	$\pm 2.9$ $\Omega$	-7 %	0.2 $\Omega$
	99.998 33 k $\Omega$	99.996 8 k $\Omega$	-1.5 $\Omega$	$\pm 11.0$ $\Omega$	-14 %	1.1 $\Omega$
1 M $\Omega$ 4w	0.000 000 0 M $\Omega$	0.000 000 M $\Omega$	0 $\Omega$	$\pm 10$ $\Omega$	0 %	1 $\Omega$
	0.189 992 5 M $\Omega$	0.189 991 M $\Omega$	-2 $\Omega$	$\pm 29$ $\Omega$	-7 %	2 $\Omega$
	0.999 975 9 M $\Omega$	0.999 963 M $\Omega$	-13 $\Omega$	$\pm 110$ $\Omega$	-12 %	20 $\Omega$
10 M $\Omega$ 4w	0.000 000 M $\Omega$	0.000 00 M $\Omega$	0.00 k $\Omega$	$\pm 0.10$ k $\Omega$	0 %	0.01 k $\Omega$
	1.899 915 M $\Omega$	1.899 98 M $\Omega$	0.06 k $\Omega$	$\pm 0.86$ k $\Omega$	7 %	0.04 k $\Omega$
	10.000 344 M $\Omega$	10.000 50 M $\Omega$	0.16 k $\Omega$	$\pm 4.10$ k $\Omega$	4 %	0.40 k $\Omega$
100 $\Omega$ 2w	0.000 00 $\Omega$	0.000 2 $\Omega$	0.2 m $\Omega$	$\pm 4.0$ m $\Omega$	5 %	2.1 m $\Omega$
	9.999 62 $\Omega$	10.000 8 $\Omega$	1.2 m $\Omega$	$\pm 5.0$ m $\Omega$	24 %	2.3 m $\Omega$
	18.998 94 $\Omega$	19.000 1 $\Omega$	1.2 m $\Omega$	$\pm 5.9$ m $\Omega$	20 %	2.5 m $\Omega$
	99.998 47 $\Omega$	99.997 2 $\Omega$	-1.3 m $\Omega$	$\pm 14.0$ m $\Omega$	-9 %	3.0 m $\Omega$
1 k $\Omega$ 2w	0.000 000 0 k $\Omega$	0.000 001 k $\Omega$	1 m $\Omega$	$\pm 10$ m $\Omega$	10 %	2 m $\Omega$
	0.189 994 0 k $\Omega$	0.189 994 k $\Omega$	0 m $\Omega$	$\pm 29$ m $\Omega$	0 %	4 m $\Omega$
	1.000 009 5 k $\Omega$	1.000 000 k $\Omega$	-10 m $\Omega$	$\pm 110$ m $\Omega$	-9 %	19 m $\Omega$
10 k $\Omega$ 2w	0.000 000 k $\Omega$	0.000 00 k $\Omega$	0.00 $\Omega$	$\pm 0.10$ $\Omega$	0 %	0.01 $\Omega$
	1.900 021 k $\Omega$	1.900 00 k $\Omega$	-0.02 $\Omega$	$\pm 0.29$ $\Omega$	-7 %	0.03 $\Omega$
	9.999 844 k $\Omega$	9.999 70 k $\Omega$	-0.14 $\Omega$	$\pm 1.10$ $\Omega$	-13 %	0.14 $\Omega$
100 k $\Omega$ 2w	0.000 00 k $\Omega$	0.000 0 k $\Omega$	0.0 $\Omega$	$\pm 1.0$ $\Omega$	0 %	0.1 $\Omega$
	19.000 43 k $\Omega$	19.000 1 k $\Omega$	-0.3 $\Omega$	$\pm 2.9$ $\Omega$	-10 %	0.3 $\Omega$
	99.998 33 k $\Omega$	99.997 2 k $\Omega$	-1.1 $\Omega$	$\pm 11.0$ $\Omega$	-10 %	1.1 $\Omega$
1 M $\Omega$ 2w	0.000 000 0 M $\Omega$	0.000 001 M $\Omega$	1 $\Omega$	$\pm 10$ $\Omega$	10 %	2 $\Omega$
	0.189 992 5 M $\Omega$	0.189 991 M $\Omega$	-2 $\Omega$	$\pm 29$ $\Omega$	-7 %	2 $\Omega$
	0.999 975 9 M $\Omega$	0.999 962 M $\Omega$	-14 $\Omega$	$\pm 110$ $\Omega$	-13 %	20 $\Omega$
10 M $\Omega$ 2w	0.000 000 M $\Omega$	0.000 00 M $\Omega$	0.00 k $\Omega$	$\pm 0.10$ k $\Omega$	0 %	0.01 k $\Omega$
	1.899 915 M $\Omega$	1.899 99 M $\Omega$	0.07 k $\Omega$	$\pm 0.86$ k $\Omega$	8 %	0.05 k $\Omega$
	10.000 344 M $\Omega$	10.000 53 M $\Omega$	0.19 k $\Omega$	$\pm 4.10$ k $\Omega$	5 %	0.40 k $\Omega$
100 M $\Omega$ 2w	0.000 00 M $\Omega$	0.000 0 M $\Omega$	0.0 k $\Omega$	$\pm 10.0$ k $\Omega$	0 %	0.1 k $\Omega$
	18.999 57 M $\Omega$	19.001 5 M $\Omega$	1.9 k $\Omega$	$\pm 153.0$ k $\Omega$	1 %	0.9 k $\Omega$
	100.000 27 M $\Omega$	100.008 8 M $\Omega$	8.5 k $\Omega$	$\pm 810.0$ k $\Omega$	1 %	10.1 k $\Omega$

Ceský metrologický institut  
 Oblastní inspektorát Brno  
 Okružní 31  
 338 00 Brno  
 -9-

**Kmitočet**

Hodnota nastavená	Hodnota zjištěná	Absolutní chyba	Specifikace výrobce	Čerpání specif.	Nejistota měření
10.000 000 Hz	10.000 04 Hz	0.000 04 Hz	$\pm 0.003\ 00\ \text{Hz}$	1%	0.000 43 Hz
40.000 000 Hz	40.000 1 Hz	0.000 1 Hz	$\pm 0.004\ 0\ \text{Hz}$	3%	0.001 5 Hz
1.000 000 0 kHz	1.000 009 kHz	0.009 Hz	$\pm 0.100\ \text{Hz}$	9%	0.007 Hz
300.000 00 kHz	300.003 kHz	3 Hz	$\pm 30\ \text{Hz}$	10%	2 Hz

Měřeno při napětí  $U = 1\ \text{V}_{\text{rms}}$ , sinusový průběh.

Konec kalibračního listu

Český metrologický institut  
Oblasťní inspektorát Brno  
Okružní 31  
602 00 Brno  
-9-